

**MARGARETE BERNAL DE LIMA E SILVA**



**NOVOS MATERIAIS À BASE DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) E  
RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE CAL (RPC)  
PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CURITIBA**

**2014**

**MARGARETE BERNAL DE LIMA E SILVA**

**NOVOS MATERIAIS À BASE DE  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)  
E RESÍDUOS DE PRODUÇÃO DE CAL (RPC)  
PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada como  
requisito parcial à obtenção do grau  
de Mestre. Área de Concentração:  
Engenharia e Ciência dos Materiais,  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências dos Materiais  
PIPE. Setor de Tecnologia, da  
Universidade Federal do Paraná,  
Orientador: Dr.Sc. Vsévolod Mymrine

**CURITIBA**

**2014**

*“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”*

Antoine Laurent de Lavoisier

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à coordenação, professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE, por toda a atenção dispensada.

Sou grata às equipes do LAMIR e do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, pela cordialidade, presteza e gentileza no atendimento e pelas análises realizadas.

Aos colegas do PIPE Clarice, Angel, Marcelo e Édelis pelas suas colaborações e apoio.

Agradeço especialmente ao meu orientador Pof. Dr. Vsévolod Mymrine que muito me ajudou e incentivou, dividindo comigo seu conhecimento e experiência.

Ao Prof. Dr. Waldyr de Lima e Silva Júnior, meu esposo, pelo apoio, sugestões e correções na dissertação. Ao marido Waldyr, agradeço por seu amor, compreensão e incentivo nas horas necessárias e em especial aos meus filhos: Lívia, William, Rachel e Victor pela maravilhosa e muitas vezes divertida inspiração. À pequena Catarina, neta amada que trouxe mais luz em minha vida e a meu genro Diego.

Agradeço a meus pais João e Maria Helena que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

A todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO .....	4
2.1.1 Definição.....	4
2.1.2 Geração dos RCD .....	5
2.1.3 Quantificação dos RCD .....	7
2.1.4 Composição e Caracterização dos RCD .....	8
2.1.4.1 Composição Química dos RCD .....	14
2.1.5 Impactos Ambientais gerados pelos RCD .....	14
2.1.6 Gerenciamento dos RCD.....	15
2.1.7 Legislação Pertinente .....	16
2.2 RECICLAGEM E APLICAÇÃO DOS RCD .....	18
2.3 USINAS DE RECICLAGEM.....	25
2.4 A CAL .....	27
2.4.1 Definição.....	27
2.4.2 Histórico.....	27
2.4.3 Componentes da Cal .....	31
2.4.4 Tipos de Cal.....	32
2.4.5 Resíduos de Produção de Cal .....	33
2.1.5.1 Composição Química.....	34
2.5 COMPÓSITOS .....	34
2.6 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	35
2.6.1 Objetivo Geral.....	35
2.6.2 Objetivos Específicos .....	35
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	36
3.2 ESCOLHA DOS RESÍDUOS .....	37
3.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES .....	37
3.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	39
3.5 PROCESSO DE INTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS E FORMAÇÃO DE ESTRUTURAS.....	41
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
4.1 ESTUDO DO RCD.....	43

4.1.1 Composição Química Através de FRX .....	43
4.1.2 Composição Mineralógica Através de DRX .....	43
4.1.3 Morfologia Através de MEV .....	44
4.2 ESTUDO DO RPC .....	45
4.1.1 Composição Química Através de FRX .....	45
4.2.2 Composição Mineralógica Através de DRX .....	46
4.1.3 Morfologia Através de MEV .....	47
4.3 ESTUDO DA CAL VIRGEM DE MERCADO .....	48
4.3.1 Composição Mineralógica Através de DRX .....	48
4.4 NOVOS COMPÓSITOS .....	50
4.4.1 Propriedades do Material de RCD com RPC.....	50
4.4.1.1 Resistência à Compressão .....	50
4.4.1.2 Resistência à Água .....	51
4.4.1.3 Absorção de Água .....	52
4.4.1.4 Coeficiente de Dilatação .....	53
4.4.2 Propriedades do Material de RCD com Cal Virgem.....	54
4.4.2.1 Resistência à Compressão .....	54
4.4.2.2 Resistência à Água .....	55
4.4.2.3 Absorção de Água .....	55
4.4.2.4 Coeficiente de Dilatação .....	56
4.4.3 Processos Físico-Químicos do Material de RCD com RPC.....	57
4.4.3.1 Composição Mineralógica Através de DRX .....	58
4.4.3.2 Morfologia Através de MEV .....	60
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>
<b>7. GLOSSÁRIO .....</b>	<b>66</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO POPULACIONAL NO BRASIL.....	6
FIGURA 2.2 – COMPOSIÇÃO DA FONTE GERADORA DO RCD .....	9
FIGURA 2.3 – COMPARATIVA DA COMPOSIÇÃO DE RCD NOS EUA .....	10
FIGURA 2.4 A – BERLIM PÓS-GUERRA .....	19
FIGURA 2.4 B – STALINGRADO PÓS-GUERRA .....	19
FIGURA 3.1 A – FOTO RCD .....	37
FIGURA 3.1 B – FOTO RPC .....	37
FIGURA 3.2 – FOTO DO CORPO DE PROVA .....	38
FIGURA 3.3 – MOLDE UTILIZADO NA COMPACTAÇÃO DOS CP's .....	39
FIGURA 3.4 – PRENSA MANUAL SCHULTZ.....	39
FIGURA 3.5 – PRENSA INSTRON 4476 .....	40
FIGURA 3.6 – DIFRATÔMETRO DE RAIOS-X.....	41
FIGURA 3.7 – AMOSTRAS PREPARADAS PARA ENSAIO DE MEV .....	42
FIGURA 4.1 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO RCD .....	44
FIGURA 4.2 – MEV DO RCD .....	45
FIGURA 4.3 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO RPC .....	46
FIGURA 4.4 – MEV DO RPC .....	48
FIGURA 4.5 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA CAL VIRGEM .....	49
FIGURA 4.6 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DO RCD/RPC .....	58
FIGURA 4.7 – MEV DO RCD/RPC NO 28° DIA .....	60
FIGURA 4.8 – MEV DO RCD/RPC NO 90° DIA .....	61

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – GERAÇÃO DE RCD NAS PRINCIPAIS CAPITAIS BRASILEIRAS .....	7
TABELA 2.2 – ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL .....	8
TABELA 2.3 – COMPOSIÇÃO DOS RCD NO BRASIL .....	10
TABELA 2.4 – APLICAÇÕES DE RCD RECICLADO .....	24
TABELA 2.5 – PRODUÇÃO DE CAL NOS PRINCIPAIS PAÍSES .....	29
TABELA 3.1 – COMPOSIÇÕES TRABALHADAS .....	38
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RCD POR FRX .....	43
TABELA 4.2 – ENSAIO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE RPC POR FRX .....	45
TABELA 4.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO RCD COM RPC .....	50
TABELA 4.4 – COEFICIÊNCIA DE RESISTÊNCIA À ÁGUA (CA) NO 28º DIA .....	51
TABELA 4.5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	52
TABELA 4.6 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO DE RCD/RPC .....	53
TABELA 4.7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE RCD/CAL VIRGEM .....	54
TABELA 4.8 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA A ÁGUA (CA) NO 28º DIA RCD/CAL VIRGEM .....	55
TABELA 4.9 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DO RCD/CAL VIRGEM .....	56
TABELA 4.10 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO DE RCD/CAL VIRGEM .....	57
TABELA 4.11 – INTENSIDADE DE PICOS DE RXD .....	59



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS <sub>cp</sub>	- Absorção de água
a/c	- Relação água / cimento
Cp	- Corpo-de-prova
CPII-F-32	- Cimento Portland composto com <i>filler</i> e resistência aos 32 dias
ANVI	- Empresa que comercializa misturadores de argamassa
DRX	- Difração de Raios-X
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LAMIR	- Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
LTA	- Laboratório de Tecnologia Ambiental
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
NBR	- Norma brasileira
PIGRCC	- Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
RCD	- Resíduo de Construção e Demolição
RPC	- Resíduos da Produção de Cal
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SINDUSCON-SP	- Sindicato da Indústria da Construção Civil de São Paulo
SLUMP	- Ensaio de abatimento do tronco de cone para o concreto

## RESUMO

O setor da construção civil está estruturado em torno de uma cadeia de produção linear aberta, gerando como subprodutos os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e os Resíduos da Produção da Cal (RPC). Tais resíduos podem ser fonte alternativa de matéria-prima a ser reutilizada pelo setor, mudando o paradigma da produção industrial para um modelo fechado de produção, onde os resíduos são reciclados, incorporando-se ao processo produtivo. Nesse sentido, este trabalho tem objetivo de fornecer parâmetros para a produção de um novo compósito resultante da combinação de RCD e RPC, favorecendo a sustentabilidade. As amostras foram coletadas já trituradas, limpas e secas. Em laboratório, foram feitas a pesagem das mesmas, a mistura dos resíduos seguidas da hidratação e posterior compactação em prensa manual. O processo empregado para a cura do material foi a cura a seco e então, foram realizados os ensaios mecânicos e os ensaios físico químicos. Foram estudados os parâmetros: composição química, composição mineralógica, resistência à compressão e absorção de água por imersão. O resíduo de cal foi caracterizado por um excesso de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , entre outros. Os estudos de difratometria de Raios X (DRX) explicam o crescimento da resistência dos corpos de prova, pela transformação dos carbonatos de cálcio e magnésio, entre outros, em novas formações cristalinas e amorfas. As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstraram o crescimento de conhecidos minerais de carbonato em formas cristalinas e amorfas, principais responsáveis pelo fortalecimento dos materiais de cal.

**Palavras-chave:** Resíduos de Construção e Demolição, Resíduos de Produção de Cal, Cal virgem, interações físico-químicas, formação de estruturas.

## ABSTRACT

The construction industry is structured around an open linear chain of production, generating byproducts such as the Construction and Demolition Waste (CDW) and Waste Production Cal (RPC). Such waste may become an alternative source of raw materials to be reused by the industry, changing the paradigm of industrial production for a closed model of production, where the waste is recycled, feeding the productive process. Thus, this work aims to provide parameters for the production of a new composite material resulting from the combination of RCD and RPC. This could be a viable solution for the use of large quantities of waste generated from lime production favoring sustainability, and nothing similar has been found anything in the literature. The samples were collected already crushed, clean and dry. In the laboratory, they were weighed, mixing the residues were mixed followed by hydration and subsequent compression on manual press. The process used for the cure of the material was dry curing followed by mechanical and physical chemical tests. The following parameters were studied: chemical and mineralogical composition, compressive strength and water absorption by immersion. The residue lime was characterized as having an excess of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , among others. Studies of X-ray diffraction (XRD) explain the higher strength of the specimens, the transformation of calcium carbonates and magnesium, among others, in crystalline and amorphous new formations. Analysis of scanning electron microscopy (SEM) demonstrated the growth of known carbonate minerals in crystalline and amorphous states, primarily responsible for strengthening the lime materials.

**Keywords:** Construction and Demolition Waste, lime and quicklime production waste, physical-chemical interactions, structures formation.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 ASPECTOS GERAIS

Os problemas ambientais do mundo contemporâneo são, em sua grande maioria, gerados pela ação direta ou indireta de fatores antropológicos. O homem assumiu uma função essencial quanto ao impacto negativo no meio ambiente, o que constitui uma preocupação para a humanidade (BORREGO 2008). Podemos citar como exemplo desses impactos negativos, o consumo de grandes quantidades de recursos naturais e a conseqüente produção de resíduos sólidos urbanos, gerados pelo desenvolvimento acelerado e o grande adensamento populacional, na maioria das cidades na atualidade.

A preocupação com a interação entre o homem e o meio ambiente, como aponta Grigolleti (2001), remonta ao início da civilização na Mesopotâmia como também dos Maias. Os Sumérios, cerca de 4000 anos a.C. já demonstravam cuidados com a limitação de seus recursos naturais, água e solo fértil, controlando a exploração dos mesmos. Cidades como Ur cerca de 2300 a.C. e Assur por volta de 1300 a.C. também controlavam o uso desses recursos através de obras gigantescas, como encostas, para armazenamento da água e sua legislação era severa, impedindo assim o uso abusivo desses recursos.

Já no Império Romano (753 a 476 a.C.), a preocupação com os recursos naturais não é tão evidente, contudo, introduzem a reciclagem de materiais, com a utilização de tijolos britados ou telhas em cacos, pedras trituradas em mistura com água e areia para realização de suas construções (SANTOS 2007).

Vitruvio (70 a.C.), tratadista de Arquitetura, Urbanista e estrategista militar, salientava a importância da qualidade de vida dos moradores das cidades e a relação entre ambiente construído e meio ambiente, especialmente na escolha dos materiais de construção no Livro 2 (dos dez que escreveu chamados de Tratados da Arquitetura).

Dentre os resíduos sólidos urbanos, um dos que causam maior impacto ambiental é o entulho ou RCD (Resíduos de Construção e Demolição) objeto de estudo deste trabalho. Com o avanço tecnológico, a indústria da construção civil

ganhou em termos de qualidade, produtividade, redução de custos, geração de empregos e competitividade entre empresas. Contudo, os resíduos oriundos dessa atividade são os causadores de prejuízos ambientais e sociais. Estima-se que a produção de resíduos nos aterros sanitários seja composta de 61% correspondentes a RCD, 25% de domésticos e 14% de outros. Praticamente todas as atividades desenvolvidas no setor da construção civil, são geradoras de resíduos, conforme dados da Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério das Cidades (diagnóstico SNIS 2007).

Os elevados números de geração desses resíduos, especialmente dos resíduos de construção e demolição, clamam pelo aproveitamento dos resultados desta pesquisa em nível industrial, levando a uma grande contribuição da proteção do meio ambiente. Em pesquisa realizada por Bonfante, Mistura e Naime (2002), foi demonstrado que 83% dos RCD possuem um alto potencial para reciclagem, comprovando ser esta a única indústria capaz de absorver quase que totalmente os resíduos que produz (BERNARDES 2006). Contudo, a observação da literatura científica e tecnológica mundial disponível, demonstra uma ausência no aproveitamento da parte inorgânica de RCD como matéria-prima principal de novos materiais de construção civil, utilizando como ligante o RPC ou cal virgem de mercado.

Em pesquisa preliminar para obtenção de materiais com altas propriedades mecânicas, MYMRINE estudou diferentes misturas, utilizando: tijolos queimados, cerâmicas, telhas de asbo-cimentos, vidros, etc., com impurezas de materiais orgânicos, também usando como ligante o RPC ou cal virgem de mercado. A tecnologia preconizada para a fabricação destes novos produtos foi a compactação das misturas homogeneizadas de RCD com RPC ou cal de mercado, hidratação e a sua compactação sem queima.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Partindo desse pressuposto, delimitou-se o tema para esta dissertação: o desenvolvimento de um novo material a base de RCD e RPC. A escolha deste tema justifica-se na medida em que contribui para a consolidação do que se entende por

crescimento sustentável - definido pelo Relatório Bruntland (documento elaborado em 1987 pela Comissão Mundial da ONU, na Conferência das Nações Unidas, definindo diretrizes para desenvolvimento sustentável) como sendo aquele que “satisfaça as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades” - englobando o reuso e a reciclagem de materiais descartados pela Construção Civil, sem prejuízo ao meio ambiente.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O presente capítulo aborda o contexto sobre o qual está inserida a pesquisa, sendo aqui apresentados seus aspectos gerais, seus objetivos, delimitações e a sua estrutura.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre RCD, RPC, reciclagem, sustentabilidade, os resíduos de construção e demolição, a cal, os compósitos e argamassas.

No capítulo 3 é descrita a metodologia empregada para a execução dos ensaios, para a escolha e a caracterização dos resíduos, a definição das composições, a confecção dos corpos-de-prova, o estudo de propriedades mecânicas (resistências a compressão uniaxial, resistências a água, dilatação, absorção de água), os ensaios de interação físico-químicos entre os componentes das diferentes misturas, os ensaios de teor de carbonatos, a difração de raios-X e a microscopia eletrônica de varredura dos corpos-de-prova.

No capítulo 4 estão demonstradas as análises dos resultados obtidos a partir dos ensaios, utilizando microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e absorção de água.

No capítulo 5 apresentam-se as considerações finais e conclusões baseadas neste trabalho, bem como, sugestões para futuros trabalhos de pesquisa.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – RCD

#### 2.1.1 Definição

Segundo Ângulo (2000) a definição de RCD é motivo de discordância entre autores, quanto à abrangência das frações presentes e quanto às atividades geradoras dessas frações. Esta teoria é reforçada por Santos (2007).

*“Resíduos da construção civil são: os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulho de obras metralha ou calça”.*

(CONAMA 2002)

A Resolução 307 do CONAMA de 2002 não apenas define o que são os RCD, mas, também, as responsabilidades e deveres sobre os resíduos e ainda os classificam de acordo com as possibilidades de reciclagem em:

- A - reutilizáveis ou recicláveis como agregados de construção, pavimentação e pré-moldados;
- B - recicláveis para outras destinações, tais como os plásticos;
- C - sem tecnologia de reciclagem economicamente viável;
- D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção ou demolição, tais como: tintas, solventes, óleos, provenientes de clínicas radiológicas etc.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 10004, classifica os diversos tipos de resíduos sólidos segundo riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, visando o manuseio e a destinação final dos resíduos.

De acordo com essa norma, os RCD são classificados na Classe II B – Inertes definidos como:

*“quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT 10007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.*

### 2.1.2 Geração de RCD

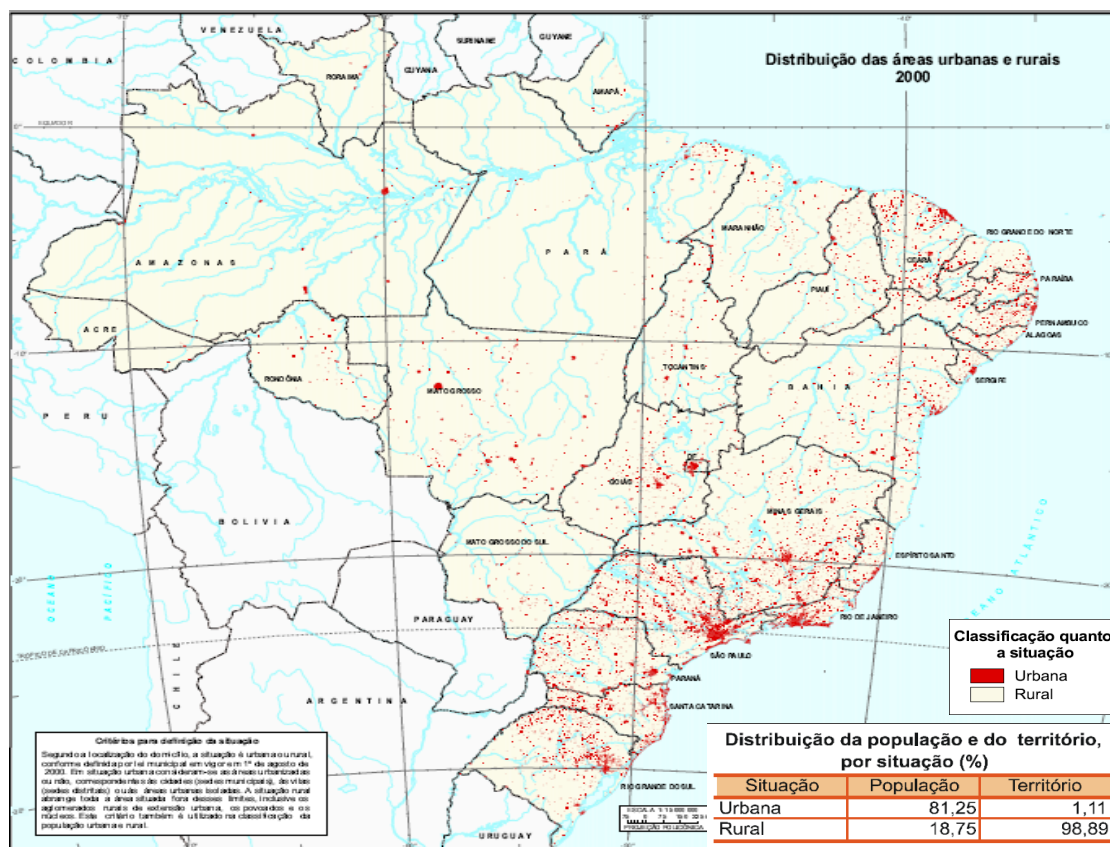
Em linhas gerais, os RCD são gerados em três etapas distintas: durante a construção, a manutenção e a demolição. Desastres naturais como terremotos, furacões, enchentes e mais recentemente a Tsunami no Japão em março de 2011, constituem outra fonte geradora de RCD.

A indústria da construção civil destaca-se como uma grande geradora de resíduos, e, a quantidade destes é diretamente proporcional ao grau de desenvolvimento de uma cidade, resultado da maior atividade econômica e dos hábitos de consumo decorrentes (espaços para trabalho, moradia e lazer), (SCHNEIDER, 2003).

A Fundação João Pinheiro, órgão oficial de estatística do governo de Minas Gerais, vem discutindo o déficit habitacional brasileiro, estimado em cerca de 6,4 milhões de moradias, o que levará ao aumento de geração dos resíduos resultantes das futuras atividades de construção, demolição ou reforma das unidades habitacionais.

Em 1960, 10% da população mundial residiam nas cidades. No Brasil, esse percentual chega hoje a 80%, concentrando-se nas vinte e seis regiões metropolitanas do país, onde vivem pouco mais de 40% da população, segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro da Geografia e Estatística SENSO - 2000), como demonstrado no mapa a seguir:





**FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO NO BRASIL**

Fonte: IBGE SENSO 2000

Conforme dados do SENSO de 2010, houve uma mudança pouco expressiva desde o SENSO de 2000, pois de acordo com a última pesquisa, o contingente populacional aumentou em apenas 2%. Portanto, o índice populacional nos centros urbanos apresenta-se na faixa de 82%.

Pinto (1987) estimou a geração de resíduos nas principais capitais brasileiras. A Tabela 2.1 apresenta os dados referentes a este estudo, onde a cidade de São Paulo ocupa o primeiro lugar e a cidade de Curitiba aparece em 4º lugar. No caso de São Paulo, o Departamento de Limpeza urbana da Prefeitura, estima que em 2003, foram geradas aproximadamente 518.000 t. Curitiba por sua vez, segundo dados da Prefeitura Municipal a geração estimada de resíduos de RCD é a de 76.250 t mensais, valor próximo ao estimado pelo autor.

TABELA 2.1 - GERAÇÃO DE RCD NAS PRINCIPAIS CAPITAIS BRASILEIRAS.

<b>Capitais</b>	<b>Geração estimada de resíduos (ton.)</b>
<b>São Paulo</b>	372.000
<b>Belo Horizonte</b>	102.000
<b>Brasília</b>	85.000
<b>Curitiba</b>	74.000
<b>Porto Alegre</b>	58.000
<b>Fortaleza</b>	50.000
<b>Salvador</b>	44.000
<b>Florianópolis</b>	33.000
<b>Rio de Janeiro</b>	27.000
<b>Recife</b>	18.000

Fonte: Adaptado de PINTO (1987).

### 2.1.3 Quantificação de RCD

Segundo Pinto (1999), três formas podem ser utilizadas para a mensuração deste contingente (RCD): por área construída, pela movimentação de cargas em coletores e pelo monitoramento de descargas. Devido a falta de fiscalização eficiente, esse último é de difícil realização pois é facilmente camuflado no ambiente urbano. A quantidade de RCD (Resíduos de Construção e Demolição) gerada é elevada em grande parte dos países, variando de 136 a 3658 kg/habitante/ano (JOHN, 2000 e PINTO, 1999) e estima-se que representem de 13 a 80%, em massa, dos resíduos sólidos urbanos gerados. (ÂNGULO, 2000).

A Tabela 2.2 apresenta um comparativo entre a geração de resíduos de construção produzida pelo Brasil e por alguns países cujos estudos são feitos em maior escala.

TABELA 2.2 – ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

País	Quantidade Anual		Fonte
	Mton/ano	Kg/hab	
Suécia	1,2 – 6	136-680	TOLSTOY, BÖRKLUND & CARLSON (1998), EU (1999)
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1300	LAURITZEN (1998); BROSSINK; BROUWERS & VAN KESSEL (1996); EU (1999)
EUA	136 – 171	463 – 584	EPA (1998); PENG, GROSSKOPF, KIBERT (1994)
UK	50 – 70	880 – 1120	DETR (1998); LAURITZEN (1998) LAURITZEN (1998), EU (1999)
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359	
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2010	
Itália	35 – 40	600 – 690	
Alemanha	79 – 300	963 – 3658	
Japão	99	785	KASAI (1998)
Portugal	3,2	325	EU (1999)
Brasil	NA	230 – 660	PINTO (1999)

Fonte: JOHN, 2000 *apud* BRITO FILHO, 1999.

#### 2.1.4 Composição e caracterização dos RCD

O RCD possui características bastante peculiares. Por ser produzido num setor onde há uma gama muito grande de diferentes técnicas e metodologias de produção e cujo controle da qualidade do processo produtivo é recente, características como composição e quantidade produzida dependem diretamente do estágio de desenvolvimento da indústria de construção local (qualidade da mão-de-obra, técnicas construtivas empregadas, adoção de programas da qualidade, etc.). Dessa forma, a caracterização média desse resíduo está condicionada a parâmetros específicos da região geradora do resíduo analisado.

O resíduo se apresenta na forma sólida, com características físicas variáveis, que dependem do seu processo gerador, podendo apresentar-se tanto em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção (como a da areia e a da brita), como em formatos e dimensões irregulares. De acordo com Bernardes (2006), na composição dos RCD predomina a fração mineral, porém, é importante ressaltar que este conjunto apresenta uma grande diversidade de matérias-primas, técnicas e metodologias empregadas na construção civil que

afetam as características dos resíduos gerados e influenciam sua composição química. A variabilidade na sua composição apresenta ainda características diferentes entre países, estados, cidades e até mesmo entre os bairros de uma mesma cidade.

É fundamental ressaltar ainda, a importância de classificar ou conhecer a fonte geradora desse entulho (construção, reforma, demolição ou desastres naturais) e ainda, o porte da obra sem deixar de mencionar a tipologia da construção (industrial, residencial, comercial etc). Em suas análises do mercado brasileiro, o SINDUSCON SP chegou a seguinte conclusão:

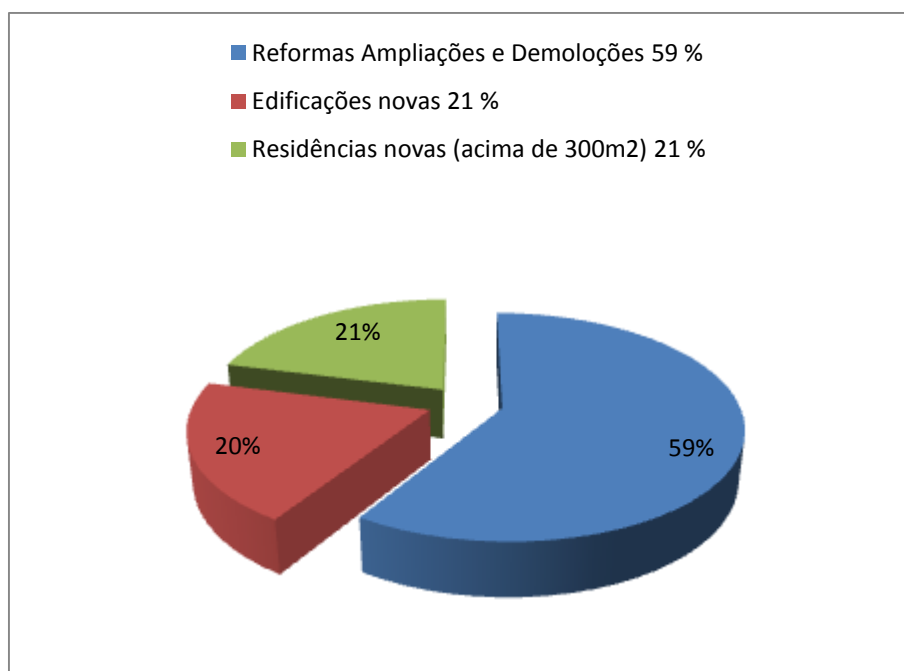


FIGURA 2.2 – COMPOSIÇÃO DA FONTE GERADORADO RCD NO BRASIL

Fonte: [www.sinduscon.com.br](http://www.sinduscon.com.br)

Embora os resíduos de construção sejam similares aos resíduos de demolição, os primeiros são mais limpos, pois ainda não foram submetidos a pinturas ou misturados a outras substâncias de tratamento de superfícies, que podem percolar pelo solo, contaminando-o (OLIVEIRA, 2003).

Em países desenvolvidos, a construção de edifícios gera uma quantidade maior de papel, plástico e madeira, provenientes das embalagens dos materiais, enquanto que em países em desenvolvimento são geradas grandes quantidades de

concreto, argamassa, blocos e outros, devido às altas perdas do processo (CASSA,CARNEIRO,BRUM 2001). A EPA – *Environmental Protection Agency* (EUA) do estado americano do Wisconsin divulgou os dados resultantes dos estudos feitos pela entidade, demonstrando as diferenças na composição dos resíduos ilustrados na figura 2.3 abaixo.

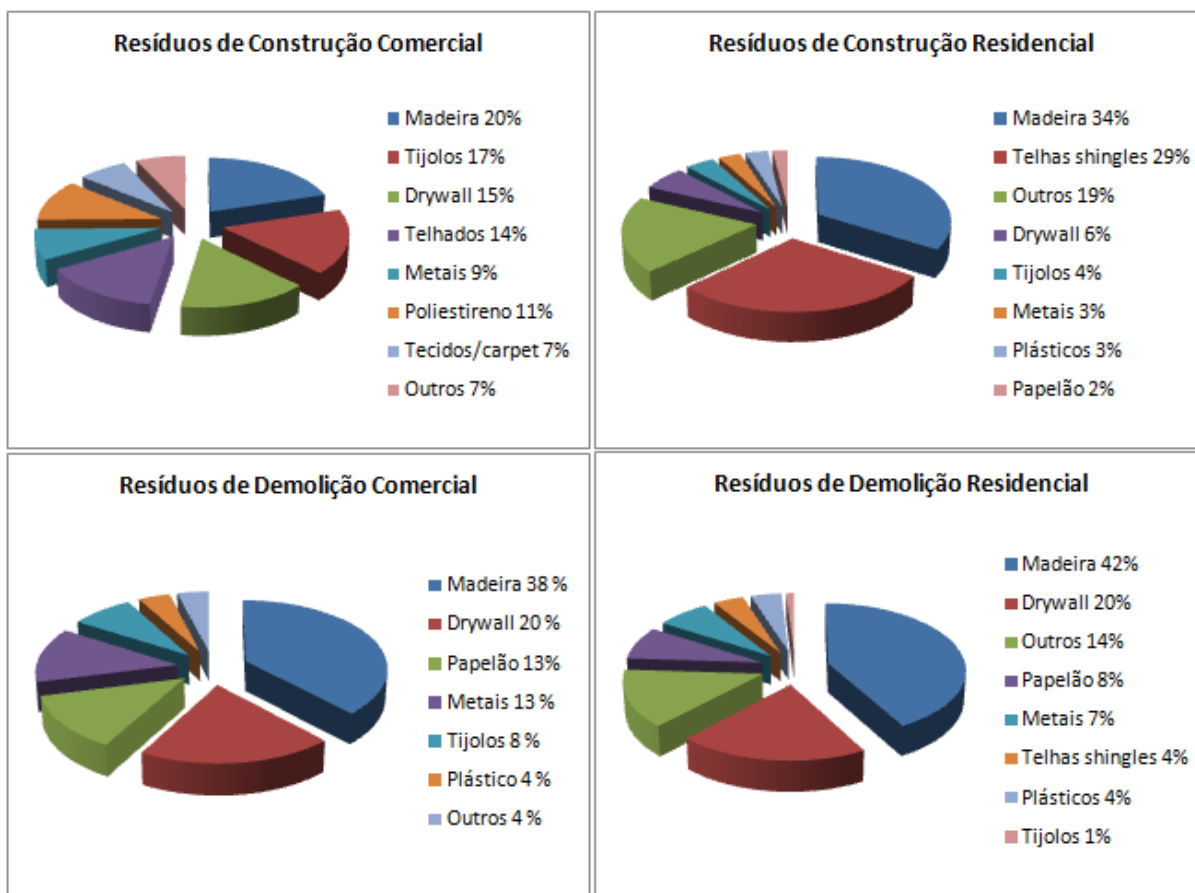


FIGURA 2.3 – COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE RCD NOS EUA

Fonte: ([www.clark.wa.gov/recycle/ConstructionandDemolition.pdf](http://www.clark.wa.gov/recycle/ConstructionandDemolition.pdf))

Na tabela a seguir, é possível verificar a variação das porcentagens de material, registradas em diferentes estudos realizados em cidades no Estado de São Paulo. Ao contrário do estudo americano, os dados encontrados por pesquisadores no Brasil, demonstram que o concreto, a argamassa, as pedras e as cerâmicas predominam na composição dos resíduos de RCD, independente da origem, se construção ou demolição.

TABELA 2.3 - COMPOSIÇÃO DOS RCD NO BRASIL

COMPONENTE	% em massa			LEITE (2001) <sup>3</sup>	CARNEIRO (2001) <sup>4</sup>
	ZORDAN (1997) <sup>1</sup>	LATTERZA (1998) <sup>1</sup>	ÂNGULO (2000) <sup>2</sup>		
Concreto	21,1	14,6	44	15,18	53
Argamassa	37,4	46,2	28	28	Sem dados
Pedras	17,7	19,2	23	29,84	27
Cerâmicos	22,8	19,1	04	26,33	14
Outros	0,5	0,9	01	0,39	2
Plásticos	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados	4
<sup>1</sup> usina de Ribeirão Preto, SP					
<sup>2</sup> usina de Santo André, SP					
<sup>3</sup> usina de Porto Alegre, RS					
<sup>4</sup> usina de Salvador, BA					

Fonte: CORREA 2005, SANTOS 2006.

De acordo com Zordan (2000) os RCD, sejam, talvez, os mais heterogêneos de todos os resíduos industriais. Nesta pesquisa, foram utilizados resíduos compostos em sua maioria de argamassa, concreto e tijolos.

As argamassas são materiais de construção constituídos por uma mistura de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água. É essencialmente um concreto sem agregado graúdo (MEHTA e MONTEIRO, 1994). As argamassas são muito empregadas em construção: no assentamento de pedras, tijolos e blocos nas alvenarias, onde favorecem a distribuição dos esforços; nos trabalhos de acabamento como emboço e reboco; nos acabamentos de tetos e pisos; nos reparos de obras de concreto; nas injeções, etc. (PETRUCCI, 1976).

Segundo a NBR nº 7200 (ABNT, 1998), argamassas são compostos por aglomerantes, água e agregados. São definidas pelo aglomerante, podendo ser de cal, cimento ou mistas. Tem como característica elasticidade e trabalhabilidade inicial com posterior endurecimento, adquirindo resistência e durabilidade.

Para que possamos ter um desempenho adequado das argamassas utilizadas nas edificações é necessário que as mesmas apresentem características básicas, tais como resistência mecânica, durabilidade, baixa permeabilidade, pouca retração, isolamento térmico e acústico — no estado endurecido — e trabalhabilidade, plasticidade e retenção de água — no estado fresco (Santana et al, 2001).

As funções fundamentais a serem desempenhadas pelas argamassas são (Veiga, 1997) (Veiga, 2005):

- regularização das alvenarias, criando uma superfície uniforme e isenta de imperfeições capaz de receber os revestimentos finais;
- proteção dos edifícios da ação direta dos agentes externos,
- impermeabilização das fachadas (no caso de revestimentos exteriores), no sentido contribuir para a estanqueidade das paredes exteriores à ação de intempéries.

Para garantir essas funções, os requisitos mais significativos a serem prescritos aos revestimentos de paredes exteriores, de acordo com as exigências aplicáveis aos produtos, materiais e sistemas na construção de edifícios estão relacionados com a questão da durabilidade e adequabilidade, e são (Veiga, 2005a):

- capacidade de impermeabilização em zona não-fissurada (no caso dos revestimentos exteriores);
- resistência à fissuração;
- resistência mecânica;
- capacidade de promover a retirada do vapor de água formado no interior e da água infiltrada, por evaporação;
- boa aderência ao suporte;
- durabilidade às ações externas, denominadas às ações climáticas (no caso dos revestimentos exteriores);
- aspecto estético aceitável;
- capacidade de regularização;

A NBR 13530 (ABNT, 1995) descreve a classificação das argamassas segundo vários critérios:

- quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- quanto à função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;

- quanto a propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica,
- hidrófuga e termoisolante.

Usualmente nas obras utilizam-se as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas. A partir de 31 de Outubro de 2005, a norma reformulada NBR 13281 (ABNT, 2005) com o mesmo título, entrou em vigor, ampliando para sete os requisitos para as argamassas:

- P – resistência à compressão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005);
- M – densidade de massa aparente no estado endurecido ( $\text{kg/m}^3$ ) – NBR 13280 (ABNT, 2005);
- R – resistência à tração na flexão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005);
- C – coeficiente de capilaridade ( $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ) – NBR 15259 (ABNT, 2005);
- D – densidade de massa no estado fresco ( $\text{kg/m}^3$ ) – NBR 13278 (ABNT, 2005);
- U – retenção de água (%) – NBR 13277 (ABNT, 2005);
- A – resistência potencial de aderência à tração (MPa) – NBR 15258 (ABNT, 2005).

O concreto é o material mais amplamente empregado em construção normalmente feito com a mistura de cimento Portland com areia, pedra e água. Composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhados partículas ou fragmentos de agregados graúdos, agregados miúdos ou escória de alto forno (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A classificação do concreto quanto à resistência à compressão, referida a 28 dias é: concreto de baixa resistência: menor que 20 MPa; concreto de resistência moderada: de 20 a 40 MPa; concreto de alta resistência: superior a 40 MPa. Quanto à composição química, sabe-se que os constituintes  $\text{C}_3\text{S}$  - alita ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – silicato tri-cálcio ) e a  $\text{C}_2\text{S}$  - belita ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  – silicato di-cálcio) são os mais diretamente responsáveis pelo crescimento da resistência.

Tijolo e Bloco Cerâmico acredita-se que a primeira queima da argila ocorreu por volta de 23.000 a.C. Em recentes descobertas, foram encontrados tijolos de 7000 e 6395 a.C., em Jericó e em Çatalhuyuk, respectivamente



(OBERMEIER&VIEIRA 1998, GRIGOLETTI 2001). Provavelmente seu emprego deve-se a dificuldade ou impossibilidade do emprego de rochas e madeira, na região do Tigre e Eufrates. Os tijolos foram uma inovação tecnológica importante, pois permitiram erguer edifícios resistentes à temperatura e à humidade, empregando a verticalidade nas construções, isto é, construindo edifícios cada vez mais altos. Os tijolos podem ser fabricados a partir de argila, argila xistosa, silicatos de cálcio ou cimento; a argila, no entanto é o elemento mais barato e comum.

#### 2.1.4.1 Composição Química

Considerado como produto básico da indústria da construção civil, o concreto de cimento Portland utiliza, em média, por metro cúbico, 42% de agregado graúdo (brita), 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos. Como se observa, cerca de 80% do concreto é constituído de agregados.

Os componentes principais do cimento Portland são: 60 a 67% de cal ( $\text{CaO}$ ), 17 a 25% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 3 a 8% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 0,5 a 6,0% de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), 0,1 a 6,5% de magnésia ( $\text{MgO}$ ), 0,5 a 1,3% de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) e sulfatos ( $\text{SO}_3$ ). Os óxidos de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), de manganês ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) e anidrido fosfórico ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), são encontrados em pequena quantidade, geralmente não são determinados separadamente (PETRUCCI, 1993).

Ângulo, em 2000, considerou que o concreto correspondia a 44% dos resíduos na usina de Santo André (SP), em relação a 28% de argamassa. Já Latterza em 1998, informa a composição de 14,6% de concreto contra 46,2% de argamassa na usina de Ribeirão Preto (SP); enquanto que Zordan, em 1997 (três anos antes de Ângulo) relaciona 21,1% de concreto em relação a 37,4% de argamassa nos resíduos da cidade de Ribeirão Preto (SP).

#### 2.1.5 Impactos Ambientais gerados pelos RCD

Segundo Resolução do CONAMA nº1 de 23 de janeiro de 1986, impacto ambiental é:

*“.....qualquer alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem a saúde; a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais” (BRASIL 1986).*

Segundo análise realizada por Pinto (1999), os RCD são de baixa periculosidade, contudo, o maior impacto se dá pelo volume gerado e o descarte aleatório e ilegal. Desta forma, ficam evidentes seus efeitos negativos sobre as malhas urbanas, como o surgimento de aterros clandestinos, entupimentos de sistemas de drenagens, assoreamento de rios, etc., contribuindo para um alto custo social e econômico para as cidades de médio e grande porte. (PINTO, 1999 e ÂNGULO, 2000).

Quando não permitem a recuperação ou reabilitação da área, os resíduos gerados causam impacto ambiental, pois aumentam a necessidade de ocupação do solo para a deposição deste material. Tal solo poderia ser ocupado para outras atividades. Comprometem ainda a segurança da população, que muitas vezes é compelida a dividir as pistas de rolamento com os automóveis, pois as calçadas estão tomadas por resíduos descartados indevidamente. Nos dias de hoje, o ato de descartar materiais na natureza pode ser considerado crime ambiental.

#### 2.1.6 Gerenciamento dos RCD

A gestão dos resíduos é um serviço público de caráter coletivo e que terá sempre o Estado como definidor de política, regulador e controlador. Já a prestação dos serviços não é uma atribuição do Estado e esta pode ser realizada por empresas contratadas ou pela comunidade organizada; ao usuário destes serviços interessa que o mesmo tenha baixo custo e melhor qualidade (SCHNEIDER, 2003).

Países como Canadá, Japão, Bélgica, Suécia, Itália, Alemanha, Dinamarca e Austrália, têm 100% de seus serviços essenciais realizados pelo Poder Público, conforme aponta Schneider (2003). O Brasil vai na contramão desses países,

terceirizando serviços a médio prazo, impedindo assim a queda dos custos nos serviços públicos de limpeza urbana. No Brasil ainda adota-se a gestão corretiva de resíduos, que consiste num conjunto de medidas não preventivas como o aterramento de terrenos baldios, alagados sem resultados positivos.

A partir de 2002, é notável a produção de políticas públicas, normas e especificações técnicas voltadas ao equacionamento dos problemas provocados pelos RCD. A política pública é entendida como um conjunto de diretrizes voltadas para o enfrentamento dos problemas provocados por estes resíduos, consolidadas na forma da Lei. Normas e especificações técnicas são documentos que fixam padrões reguladores visando garantir a qualidade do produto, a racionalização da produção e sua uniformidade (SCHNEIDER, 2003).

O quadro normativo, como classifica Schneider (2003), está composto por órgãos do poder público em suas diversas esferas como o SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente, estabelecido pela lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 e compreende:

- Órgão superior – Conselho de Governo;
- Órgão consultivo e deliberativo – Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA);
- Órgão Central – Ministério do Meio Ambiente (MMA);
- Órgão Executivo – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

#### 2.1.7 Legislação Pertinente

Há um conjunto de políticas de leis e políticas públicas, contribuindo para minimizar o impacto ambiental. Dentre elas o PBPQ-H-Programa Brasileiro de Produtividade e Qualidade do Habitat, Lei Federal nº 9605 de 12 de fevereiro de 1998 – Dos Crimes Ambientais, e legislações municipais referentes à Resolução do CONAMA.

No Brasil, a legislação pertinente aos RCD ainda é pouco expressiva se comparada às vigentes nos Estados Unidos, na Europa e mesmo na Ásia (SCHNEIDER et al., 2003). No entanto, a resolução nº 307 de 05 de julho de 2002,

do CONAMA, vem a ser um marco neste sentido, pois regulamenta definições nos aspectos que tangem os RCD, atribui responsabilidades aos geradores, transportadores e gestores públicos, estabelecendo ainda, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil, assim como as ações necessárias à minimização dos impactos ambientais (SANTOS 2007).

Em 2004, foram publicadas as primeiras normas nacionais relacionadas aos RCD, contidos na classe A, de classificação dada pela Resolução 307 do CONAMA. As especificações da ABNT são:

- NBR 10004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação;
- NBR 8419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 8849 – Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 10007/04 – Amostragem de resíduos sólidos;
- NBR 12235 – Armazenamento de resíduos sólidos perigosos;
- NBR 11175 – Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho;
- NBR 13463 – Coleta de resíduos sólidos;
- NBR 13894 – Tratamento de solo (landfarming) – Procedimento;
- NBR 15112 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114 – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem– Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. (JUNIOR, 2005.)

## 2.2 RECICLAGEM E APLICAÇÃO DE RCD

Devidamente reciclado, o entulho apresenta propriedades físicas e químicas apropriadas para o seu emprego como material de construção (ANGULO *et al.*, 2001). Os romanos introduziram a reciclagem de materiais, como já foi apontado na introdução deste trabalho, contudo, de acordo com WEDLER, HUMMEL (1946) *apud* LEVY, HELENE (1997):

*“Só a partir de 1928, iniciaram-se pesquisas para avaliar o consumo do cimento, a quantidade da água, e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de alvenaria britada e de concreto. Porém, a primeira aplicação significativa de entulho reciclado, só foi registrada após o final da Segunda Guerra Mundial, na reconstrução das cidades européias, que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e os escombros ou entulhos resultantes foram britados para produção de agregados visando atender a demanda na época. Podendo-se dizer que somente a partir de 1946 empregou-se a tecnologia de reciclagem do entulho da construção civil”.*

Os autores mostram ainda, que mesmo tendo sua origem em meados do século XX, as técnicas utilizadas para reciclagem não foram totalmente absorvidas pela construção civil mundial. Ainda não se pode afirmar que a reciclagem tenha se tornado uma ideia amplamente difundida.

A figura 2.4 (a) e (b) registra, respectivamente, as cidades de Berlim na Alemanha e a de Estalingrado na Rússia, logo após a guerra. Nestas imagens é possível identificar edificações total ou parcialmente destruídas, gerando grande quantidade de entulho. A necessidade de reconstrução das cidades e a falta de matéria - prima levou à prática da reciclagem em larga escala por toda a Europa.



Atualmente, na Alemanha, o emprego dos agregados reciclados é liberado apenas para pavimentação. (MARQUES NETO, 2005). Não devemos nos esquecer, no entanto, que este é um país com baixa geração de resíduos. Nos países da Comunidade Européia estima-se que 80% do mercado de utilização de agregados reciclados esteja direcionado para execução de concreto com resistência até 25 MPa, resultados perfeitamente alcançáveis com os RCD reciclados (VÁZQUEZ, 1997 apud JADOVSKI, 2005). De maneira geral, atualmente países como a Finlândia, Áustria, Suécia, e Inglaterra, demonstram significativo desempenho quanto à reciclagem de RCD, chegando a 50% do montante gerado.

O Reino Unido adotou políticas de incentivo a reciclagem, entre elas a imposição de uma taxa sobre todo o material enviado para aterro; há também um incentivo para a britagem de concreto de demolição, aproveitando-se como brita em novos concretos de baixa resistência, para pavimentação de calçadas e na sub-base de estradas (ROTH, 2008). Em países como a Bélgica, Holanda, e Dinamarca os índices de reciclagem atingem 80%.

Na Dinamarca, após a implantação da taxa de disposição de RCD em aterros em 1987, a média de reciclagem se desenvolveu significativamente passando de 25%, em 1990, para 90% de reciclagem em 1999. A maior parte dos resíduos reciclados é absorvida na construção civil, como material de aterro e como sub-base e base de estradas ou construção de espaços abertos. (SCHNEIDER, 2003).

Na Holanda, o interesse pela reciclagem teve incentivo governamental através de altas taxas de disposição de resíduos em aterros públicos. (ALEX FABIANI, 2009). No ano 2000, as normas holandesas permitiram a utilização de agregados reciclados até em concreto protendido (CARNEIRO *et al.*, 2001). Esse avanço tecnológico tem como principal agente o Centro de Normas e Pesquisas em Engenharia Civil (CUR), que tem por objetivo a implantação e coordenação de projetos de pesquisa em parceria com entidades públicas e privadas no processo da construção. Ele atua nos campos de pesquisa e desenvolvimento da construção, tecnologia de materiais, estruturas de concreto, alvenaria, construção sustentável, hidráulica e geotécnica e drenagem (LEVY, 2002).

Na Espanha, Grécia, Itália e Portugal, os índices são menos expressivos, porém não desprezíveis. Já nos Estados Unidos, Canadá e Japão, a reciclagem se encontra em estágio avançado, associando tecnologia adequada, política, legislação e fiscalização eficientes, visando atingir um grau de padronização dos procedimentos adotados para obtenção do material reciclado, atendendo desta forma um padrão de qualidade (Freire & Brito 2001 apud Cunha 2007).

A reciclagem de RCD está tornando-se objeto de estudo cada vez mais difundido, pois se tornou um desafio para pesquisadores de todo o mundo. A produção de um novo material para construção civil foi estudada por Rapazote, Laginhas e Pinto (2010), tendo como objetivo desenvolver um novo processo, utilizando baixa temperatura ou geopolymerização em ambiente alcalino. Qualquer deficiência química pode ser compensada com a adição de alumina para uma ativa reação alcalina. O produto final é uma cerâmica muito dura, podendo ser utilizada como paredes de contenção, blocos de pavimentação e ainda como concreto.

No Kuwait a limitação do espaço para a deposição de RCD levou a exploração de novas possibilidades como para conservação do solo e da água. Os estudos de Suleiman, Bhat e Jacob (2013) concluíram que a utilização do RCD no solo, melhora a infiltração da água e ainda promove o crescimento e a longevidade das plantas nativas da região.

Em pesquisa realizada na Tanzânia, para a produção de blocos de concreto com agregados reciclados, Sabai, Cox, Mato e Egmond (2011), demonstraram que agregados reciclados e agregados naturais possuem semelhanças químicas

próximas, contudo os agregados reciclados demonstraram ser mais fracos mecanicamente.

Comparando-se a países de primeiro mundo, a reciclagem de RCD no Brasil ainda é tímida, com a exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e aço (ANGULO, 2001). Os primeiros estudos de resíduos aplicados à construção civil, assim como sua reciclagem, devem-se a Cincotto (1983) e Pinto (1986) (JOHN, 2000). Desde então, diversas pesquisas vem sendo realizadas por universidades e centros de pesquisas, investigando as mais diversas aplicações.

Silva (2007) cita Pinto (1999) que apresenta uma lista de vantagens para reciclagem dos RCD, e ainda Simons (1994) e Miranda (2000) apresentam em seus trabalhos ferramentas utilizadas para estimular a reciclagem. Já, Elias-Özkan (2001 apud JADOVSKI, 2005) propõe algumas medidas para facilitar o uso de agregados reciclados, entre as quais se destacam medidas municipais.

Para utilizar resíduos como matéria-prima em substituição aos materiais tradicionais, é necessário que esse insumo alternativo apresente padrões de desempenho compatíveis com a sua utilização. Nos casos em que o material reciclado e o natural têm o mesmo custo, o diferencial será a qualidade ou a confiabilidade do produto e a utilização de instrumentos de marketing, como selos verdes, de forma a garantir que o produto é ambientalmente correto (CARNEIRO *et al.*, 2001). A reciclagem de RCD para argamassas e concretos já foi pesquisada e tem se mostrado viável em estudos brasileiros do ponto de vista tecnológico e econômico. Entretanto, a avaliação do risco ambiental não foi considerada (LEVY, 1997).

Marques Neto (2005) chama a atenção para a utilização dos resíduos dentro dos próprios canteiros de obra: assentamento de blocos cerâmicos, batentes e esquadrias; enchimento de degraus de escada e de rasgos de paredes para tubulações hidráulicas e elétricas; chumbamento de caixas elétricas e tubulações; contrapisos internos de unidades habitacionais e casas de máquinas ou áreas comuns de tráfego leve reduzindo o consumo de energia e evitando o transporte do material excedente.

Os dados de Pinto (1986) e Levy (1997) indicam o bom desempenho dos RCD em argamassas contendo produtos cerâmicos em sua composição. Offermam (1987) analisou a substituição de agregados naturais por resíduos de construção, na



confeção do concreto. Como o material menor que 4 mm absorve grande quantidade de água, ele substituiu essa faixa granulométrica por areia normal. Estudando ainda agregados para concreto, Santos (2006) substituiu apenas o agregado gráudo na produção do concreto. Suas conclusões demonstram que apesar da resistência ser levemente inferior nos concretos com reciclados, à medida que se diminuem os consumos de cimento nos traços, as resistências à compressão e à tração se aproximam dos valores obtidos com concreto de referência. Já Hansen (1990) demonstrou ser possível produzir concreto a partir de concreto reciclado com a adição de cinzas volantes, sem a adição de cimento.

As verificações do comportamento dos RCD na produção de concreto para uso enquanto massa ou para produção de artefatos são mais recentes e, coerentemente com os resultados verificados na ampla bibliografia internacional existente sobre o tema, apontam para bons resultados em composições com baixo consumo de aglomerante, quando os agregados miúdos e gráudos são substituídos integralmente pelo reciclado (PINTO, 1995; ZORDAN, 1997).

Sales, Cordeiro e Souza (2004) *apud* Lima (1999) apontam que: “concretos com reciclado apresentam, em geral, resistência à compressão menor ou igual à dos concretos convencionais para consumos de cimento médios ou altos. Para baixos consumos, podem apresentar resistência maior que os convencionais. A diferença entre a resistência à compressão de concretos com reciclado e convencionais varia com o tipo de reciclado, sua qualidade e com o consumo de cimento”.

Resíduos reciclados de alvenaria são, em geral, menos resistentes e mais porosos que os de concreto, e, por isso, levam a maiores perdas de resistência do novo concreto. Schulz e Hendricks (1992), afirmam que, para se obter a mesma resistência do concreto convencional, o consumo de cimento do concreto com reciclado de alvenaria deve ser 20% maior.

Os resultados do trabalho de Levy, Helene (1996), evidenciam vantagens econômicas na utilização da reciclagem do entulho para a produção de argamassa, tanto no consumo de cimento como no de cal. Seus resultados apresentaram ainda, um crescimento de resistência à compressão para um aumento do teor de materiais cerâmicos nas argamassas, e esse aumento foi mais acentuado quanto mais rico foi o traço. O mesmo aconteceu na resistência à tração da argamassa, porém o

aumento não foi tão acentuado para o traço mais rico, como na resistência à compressão.

As argamassas produzidas com entulho apresentam uma redução de 10 a 15% no consumo de cimento, 100% no consumo de cal e, de 15 a 30% no consumo de areia, além de um ganho de resistência à compressão que varia de 20 a 100%, conforme o traço utilizado, em relação aos valores obtidos com argamassas convencionais obtidos de literatura (ZORDAN, 1997).

Se, na ponta geradora do resíduo, a reciclagem significa redução de custos, de consumo de energia, das distâncias de transporte de matérias primas e até mesmo novas oportunidades de negócios, na outra ponta do processo, a cadeia produtiva que recicla reduz o volume de extração de matérias-primas, preservando recursos naturais limitados (JOHN, 2000). Offerman (1987) propõe outras possibilidades de emprego de entulho de construção, entre elas: paredes de proteção acústica, preenchimento de vazios (aterros), preenchimento de valas de instalações, reforço e melhoria do solo, camadas de sustentação com e sem aglutinantes, etc.

A utilização de agregados reciclados permite produzir componentes de construção que, dependendo da sofisticação tecnológica, terão custos significativamente inferiores ao preço de componentes disponíveis no mercado. Segundo dados da prefeitura de Belo Horizonte, 10% da malha viária municipal possui resíduos de construção na base e sub-base de pavimentação.

Carrijo (2005) conclui que: “os resíduos de construção civil podem encontrar um grande número de finalidades para a reutilização, desde que devidamente tratados e analisados. É possível reciclar quase todo o RCD, desde que seja escolhido o uso adequado e se respeitem as limitações técnicas do material.” A revista Thecne publicou um artigo relacionando a granulometria ao uso do RCD reciclado, como demonstrado na tabela a seguir. Como é possível perceber, a utilização ainda se restringe a usos menos nobres.

TABELA 2.4 - APLICAÇÕES DE RCD RECICLADO

PRODUTO	CARACTERÍSTICAS	USO RECOMENDADO
Areia britada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Argamassa de assentamento, alvenaria de vedação, contrapiso, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco Reciclado	Material com dimensão máxima característica inferior a 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de artefatos de concreto, blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, mobiliário, entre outros.
Brita Reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de concreto não estrutural e obras de drenagem.
Brita Corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil (blocos de concreto, restos de cerâmica etc.)	Obras de base e sub-base de pavimentação, reforço e subleito de pavimentos, regularização de vias não pavimentadas, aterros e nivelamento topográfico de terrenos.
Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Obras de pavimentação, drenagem e terraplanagem.

Fonte: Revista Thecne adaptado pela autora

## 2.3 USINAS DE RECICLAGEM

Os estudos de viabilidade econômica para implantação de usinas de reciclagem ainda são pouco expressivos no Brasil. Contudo, é possível encontrar na literatura técnica, trabalhos como o de Wilburn e Goonan (1998), que estudaram a viabilidade econômica de três usinas de reciclagem nos EUA: uma de pequeno porte (110.000 t/ano), uma de médio porte (253.000 t/ano) e uma de grande porte (312.000 t/ano). No Brasil as maiores usinas de reciclagem de RCD instaladas, contam com uma capacidade de 100.000t/ano. Uma usina com capacidade de produção de 30 t/ano é capaz de atender um município com aproximadamente 1.200.000 habitantes aproximadamente (JADOVSKI, 2005).

Os investimentos para tal empreendimento devem ser de longo prazo, pois no período de adaptação do sistema, pode haver baixa produtividade e o mercado de reciclados talvez não esteja desenvolvido na região (PENG, 1997). No entanto, a avaliação dos custos da implantação de uma usina de reciclagem não é o objeto de análise do presente trabalho.

Os processos de beneficiamento de RCD classificam-se em primeira, segunda e terceira geração. O processo de primeira geração é o mais simples de todos, pois a remoção dos contaminantes é realizada de maneira manual e os metais ferrosos são removidos por eletroímã. O de segunda geração incorpora procedimentos mais sofisticados de limpeza e triagem de resíduos e as plantas de terceira geração possuem equipamentos mais avançados para tal fim. (JADOVSKI, 2005). O sucesso da reciclagem de Resíduos depende dentre outros, de fatores como: tamanho e localização do terreno utilizado, da equipe e dos equipamentos apropriados.

De acordo com Jadovski (2006), de modo geral, os equipamentos utilizados na reciclagem de resíduos são provenientes do setor de mineração, que são adaptados ou simplesmente utilizados na reciclagem, mesmo que esta atividade exija um sistema diferenciado, devido à variabilidade e contaminação dos RCD, onde a separação manual ainda é a mais utilizada para contaminantes e um separador magnético para equipamentos complementares. Desta maneira, o processo de reciclagem de RCD deve observar as etapas de limpeza e seleção

prévias, com a eliminação de contaminantes, extração de materiais metálicos, homogeneização, trituração e estocagem para expedição. Para se determinar o tipo de processamento a ser utilizado, deve-se conhecer o grau de contaminação e o uso para o qual se destina: aterro, enchimento para drenagem, pavimentação, concreto ou artefatos de concreto. Ainda de acordo com o autor, ele cita a importância de adotar-se um formato modular de Central de Reciclagem, com capacidade de processamento entre 15 t/h e 30 t/h e a implantação descentralizada das áreas de reciclagem.

Jadovski cita ainda outros autores que em seus estudos avaliam a capacidade operacional de uma usina de reciclagem, analisando os seguintes fatores:

- Tipo de empresa: empresa pública ou privada, pois os custos serão diferenciados;
- O tamanho da usina, pois a área requerida depende da capacidade de produção da mesma;
- Local de instalação da unidade recicladora, devendo ser o mais próximo possível das fontes geradoras e dos locais de uso e o mais distante possível de áreas residenciais e centrais, para não sobrecarregar o sistema viário circunvizinho;
- Custos de transporte entre o local de geração e a usina, o local de consumo e a usina e o local de geração e o aterro sanitário;
- Quantidade e qualidade do RCD possível de ser reciclado e aplicação pretendida para o mesmo;
- Projeto, layout e eficiência da unidade recicladora;
- Mão de obra especializada necessária;
- Custos com obras civis, abrangendo a construção da sede administrativa, barreiras vegetais e outros;
- Custos com insumos de produção;
- Custos com impostos e manutenção de equipamentos veículos e máquinas;
- Custos de equipamentos próprios e/ou alugados e despesas gerais.

## 2.4 A CAL

### 2.4.1 Definição

A Cal virgem ou Óxido de Cálcio –  $\text{CaO}$  é obtida por pirólise (decomposição térmica de 900 a 1200°C aproximadamente) de calcário das rochas carbonáticas, pois não é encontrado na natureza. O termo cal virgem é consagrado na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O nome do elemento deriva precisamente de *calx*, o nome latim para cal.

### 2.4.2 Histórico

O uso da Cal pelo homem primitivo remonta aos primórdios da Idade da Pedra (Paleolítico Superior: 25 a 10 mil anos atrás) evidenciadas nas pinturas rupestres das cavernas de Lascaux (França). Embora haja evidências da presença da cal ao longo da maior parte da existência humana, foi somente a partir da civilização egípcia que o produto começa a aparecer com frequência nas construções. Os egípcios (2501 a 2352 a.C) utilizavam uma argamassa para vedação das câmaras das Pirâmides. Arqueólogos encontraram em *Knossos* (2000 a.C.) em Creta, locais revestidos com duas camadas de argamassa feita com cal e fios de cabelos.

Os romanos começaram a utilizar cal com a Via Ápia (321 a.C.), os etruscos, primeiros a utilizarem argamassa de cal na construção de túmulos e ainda as muralhas da China (228 a.C) que em alguns trechos da obra foi empregada uma mistura compacta de terra argilosa e cal, com eventuais adições de clara de ovo, utilizadas também para a construção das fundações (DOMAKOSKI 2010).

Os gregos empregavam a cal como aglomerante, o mesmo acontecendo com os etruscos e depois com os romanos. A argamassa era preparada pelo processo que consiste na extinção de pedra cozida e mistura da pasta com areia. Essa técnica continua a ser largamente empregada onde não é necessária grande resistência mecânica, e em obras que não estejam sujeitas à ação da água. (PETRUCCI, 1976). Tanto os gregos como os romanos adicionavam terras de origem vulcânica às

argamassas de cal e areia com o intuito de melhorar sua resistência mesmo quando submetidas à ação da água.

O exame das construções dos séculos IX a XI revelou que a arte de fabricar o aglomerante achava-se quase perdida, sendo a cal usada em fragmentos mal queimados e sem adição de pozolanas. Do século XII em diante, a qualidade foi melhorando e, nas obras que ficaram, principalmente nas construídas depois do século XIV, encontram-se excelentes argamassas (PETRUCCI, 1976).

No ano de 1217, a cal (virgem e moída) teve uma utilização bélica. Os ingleses lançavam-na contra os rostos de seus inimigos franceses. Em contrapartida, na Renascença, em torno de 1500 na Itália, artistas como Michelangelo e Rafael, utilizavam com frequência uma pasta branca à base de cal em seus murais e afrescos.

No Brasil, Thomé de Souza que aqui chegava como 1º Governador-Geral, ordenou a criação da primeira mineração de calcário, na Baía de Todos os Santos em 1549, ansioso para obter materiais para a construção da capital dos domínios portugueses na América.

Em 1775, o químico inglês Joseph Black, em Edinbourg, dá a primeira explicação técnico-científica sobre a calcinação de calcários, incluindo a expulsão do anidrido carbônico como gás. Alguns anos mais tarde, Lavoisier reafirmou a teoria de Black. No ano de 1780, Higgins publica os resultados de suas pesquisas demonstrando que o endurecimento da cal resulta da sua combinação com o gás carbônico do ar.

Com a afirmação dos princípios científicos básicos relativos à fabricação da cal virgem e cal hidratada, iniciou-se no final do século XIX um novo período de evolução industrial do produto – mineração, tratamento do minério, fornos, combustíveis, energia, economia e recursos humanos. Essa evolução revela-se não só pelo crescimento contínuo da produção como também pela multiplicidade de aplicações alcançada pelo produto nos dias atuais. A Europa deu grande impulso à moderna indústria da cal, sobretudo França, Inglaterra e Alemanha, sendo seguida pelos Estados Unidos. O Brasil só entrou para o grupo da indústria moderna da cal a partir de 1950 (SOARES 2007) e hoje ocupa o sexto lugar na produção, segundo dados do *International Lime Association*. A tabela 2.5 apresenta a porcentagem de produção de cal dos maiores produtores do planeta.

TABELA 2.5 PRODUÇÃO DE CAL NOS PRINCIPAIS PAÍSES (1994/2004).

PAÍS	PRODUÇÃO DE CAL VIRGEM (em 1000 ton)						% em 2004
	1994	2000	2001	2002	2003	2004	
URSS (em 1990)	28.082	-	-	-	-	-	-
CHINA (em 1994)	17.017	21.500	22.000	25.000	23.000	23.500	18,65
ESTADOS UNIDOS	16.649	19.500	18.900	17.900	19.200	20.000	15,87
RÚSSIA (2000/2004)	-	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	6,35
JAPÃO	10.890	8.106	7.586	7.420	7.953	7.950	6,31
ALEMANHA	6.101	6.850	6.630	6.620	6.637	6.700	5,32
<b>BRASIL</b>	<b>5.289</b>	<b>6.273</b>	<b>6.300</b>	<b>6.500</b>	<b>6.500</b>	<b>6.500</b>	<b>5,15</b>
MÉXICO	-	5.300	4.800	5.100	5.700	5.700	4,52
TURQUIA	3.860	3.300	3.200	3.300	3.300	3.400	2,70
FRANÇA	2.822	3.100	3.000	3.000	3.000	3.000	2,38
ITÁLIA	-	3.500	3.000	3.000	3.000	3.000	2,38
BULGÁRIA	-	1.388	2.025	1.136	2.902	2.900	2,30
CANADÁ	-	2.525	2.213	2.248	2.216	2.200	1,75
IRÃ	-	2.200	2.000	2.200	2.200	2.200	1,75
REINO UNIDO	1.297	2.500	2.500	2.000	2.000	2.000	1,59
ÁUSTRIA	-	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1,59
BÉLGICA	-	2.300	2.000	2.000	2.000	2.000	1,59
ROMÊNIA	-	1.480	1.790	1.829	2.025	2.000	1,59
POLÔNIA	-	2.376	2.049	1.960	1.955	1.950	1,55
ESPANHA	-	1.700	1.700	1.800	1.800	1.800	1,43
ÁFRICA DO SUL	1.913	1.391	1.615	1.598	1.600	1.500	1,19
AUSTRÁLIA	-	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1,19
ESLOVÊNIA	-	1500	1434	1636	1500	1500	1,19
VIETNÃ	-	1.156	1.351	1.426	1.450	1.500	1,19
OUTROS	-	12.100	12.100	10.700	10.650	13.200	10,01
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>121000</b>	<b>121000</b>	<b>119000</b>	<b>124000</b>	<b>126000</b>	<b>100,00</b>

Fonte. GUIMARÃES (2002), SOARES (2007).



A produção da cal apresentou um pequeno declínio em 2001, cerca de 1%, mesmo com o aparente crescimento mostrado nos últimos anos. Ao contrário do que demonstra a tendência mundial, o Brasil passou de sétimo produtor mundial em 2000, para sexto no ano seguinte, contando com cerca de 5,2% da produção mundial. Já em 2003 a produção no mercado brasileiro ganhou mais impulso, contabilizando uma produção superior a 6,5 milhões de toneladas do produto, o que coloca o Brasil na briga pela quinta posição entre os países produtores. Essa produção concentra-se, sobretudo na produção da cal virgem industrial, que somou 4,76 milhões de toneladas, volume quase 3% superior ao de 2002, enquanto que a produção da cal hidratada manteve-se praticamente estável no período de acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC) em 2004 (SOARES 2007).

Pela multiplicidade de suas aplicações, a cal – virgem e hidratada – está entre os dez produtos de origem mineral de maior consumo mundial. O produto ganha ainda maior expressão quando se conhece o amplo leque de setores industriais e sociais que dele se utilizam, graças à sua dupla capacidade – reagente químico e aglomerante-ligante. O produto é utilizado na conservação de alimentos e na remoção dos compostos fosfáticos e orgânicos bem como no clareamento do açúcar, na agricultura para correção do pH do solo, na purificação da água, em medicamentos, na produção de aço e papel, celulose e em grande escala na construção civil (GUIMARÃES, 2002).

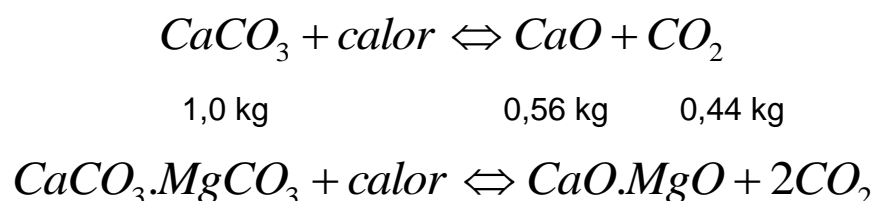
Um estudo realizado pela ABPC mostrou que 22% da produção doméstica são consumidas por seus próprios produtores; 70% é destinada às mais diferentes aplicações industriais; 3% é perdida durante o transporte do material e 5% destinada a hidratação. Apesar do nível de produção – entre 5 e 6 milhões de ton/ano – o Brasil tem baixo consumo *per-capita* (aproximadamente 36 kg/ano), a construção civil utiliza 30,3% da produção nacional, contudo, a maior parte 45,9%, fica com as indústrias metalúrgica e siderúrgica.

No contexto regional a Região Sudeste detém 85,3% da produção nacional da cal hidratada e 92% da cal virgem, enquanto a Região Sul detém 8,9% da produção da cal hidratada e 2,9% da cal virgem, a região nordeste 4,7% da cal virgem, a região centro-oeste 3,8% da cal hidratada. O Brasil apresenta baixo consumo *per capita* (aproximadamente 36 kg/ano) da cal, apesar da considerável produção, entre

5 e 6 milhões de toneladas/ano. Ainda assim, o índice está acima do consumo médio mundial, em torno de 25 kg/ano.

#### 2.4.3 Componentes da Cal

A produção de cal envolve a calcinação de calcário, liberando grande quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera, a equação química dessa calcinação fica assim:



Isso significa que, para cada tonelada de cal virgem, são produzidos 785 kg de CO<sub>2</sub>, ou mais de 590 kg para uma tonelada de cal hidratada. A obtenção de cal ocorre em fornos que transformam a calcita (carbonato de cálcio – CaCO<sub>3</sub>) o calcário calcítico, magnesiano ou dolomítico (dolomita), (carbonato de cálcio e magnésio CaCO<sub>3</sub> MgCO<sub>3</sub>) em cal virgem (óxido de cálcio e magnésio – CaO MgO), com posterior hidratação, no caso da cal hidratada (hidróxido de cálcio e magnésio – Ca(OH)<sub>2</sub> e Mg(OH)<sub>2</sub>.

A Cal hidratada é um dos principais elementos das argamassas porque promove uma série de benefícios para a edificação. Ela tem excelente poder aglomerante, assim como o cimento, que une permanentemente os grãos de areia das argamassas. Por ser extremamente fina e leve, permite o preparo de maior quantidade de argamassa, com a redução do custo do m<sup>3</sup>. Suas partículas muito finas, ao serem misturadas com água, funcionam como lubrificante, reduzindo o atrito entre os grãos de areia. O resultado é melhor trabalhabilidade (ou liga), boa aderência e maior rendimento na mão-de-obra.

As argamassas a base de cal hidratada têm resistência suficiente quanto à compressão e aderência, tanto para assentamentos como para revestimentos, para atender as normas técnicas. Por ser um produto alcalino, a cal hidratada impede a oxidação nas ferragens e, também atua como agente bactericida e fungicida. Além

disso, evita que se formem manchas e apodrecimento precoce dos revestimentos; proporciona economia de tinta, pois permite acabamento mais liso e de cor clara; é compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos, como fórmica, lambris, papéis de parede etc., se respeitado o tempo mínimo de cura de 28 dias.

É importante ressaltar ainda que as argamassas à base de cal hidratada têm baixo módulo de elasticidade, ou seja, absorvem melhor as pequenas movimentações das construções e evitam, portanto, trincas, fissuras e até o descolamento (ou queda) dos revestimentos.

Não se pode deixar de frisar a notável durabilidade que a cal hidratada confere às construções. Argamassas à base de cal hidratada podem durar centenas de anos, ou até mais. Os exemplos para comprovar essa característica são muitos, entre eles a milenar Via Ápia (na Itália) e a Casa das Retortas, na capital paulista. A cal hidratada é um produto de aplicação milenar, enquanto o cimento Portland só foi inventado em 1824.

#### 2.4.4 Tipos de Cal

A Cal virgem é classificada conforme o óxido predominante como indicado a seguir:

- Cal virgem cálcica (óxido de cálcio –  $\text{CaO}$  entre 57 e 64% e de óxido de magnésio -  $\text{MgO}$  entre 36 a 43%) de 90% a 100% dos óxidos totais;
- Cal virgem magnesiana - teores intermediários de óxidos entre 90% e 65% dos óxidos totais;
- Cal virgem dolomítica (óxidos de cálcio e de magnésio –  $\text{CaO.MgO}$ ) teores de cálcio entre entre 65% e 58% dos óxidos totais;

A Cal hidratada é classificada conforme o hidróxido predominante e de acordo com a cal virgem de origem, como indicado a seguir:

- Cal hidratada cálcica (hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$ );
- Cal hidratada magnesiana
- Cal hidratada dolomítica normal tipo N (hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio –  $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2.\text{MgO}$ ) e Cal

dolomítica hidratada especial tipo S (hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio –  $\text{Ca(OH)}_2.\text{Mg(OH)}_2$ ,

Cal silicosa, contendo pequenas percentagens de sílica, como quartzo ou outros silicatos. Cal argilosa, cal que contém aditivos argilosos (cal hidráulica natural). Cal metalúrgica, adicionada à escória, usada em fornos siderúrgicos (alto-fornos). Cal pozolânica, cal adicionada de cinzas (uso na antiga Roma, cinzas do Vesúvio) (GUIMARÃES, 2002). As pastas preparadas com excesso de água fornecem as chamadas natas. As natas de cal são utilizadas em revestimentos e pinturas; as de cimento são preparadas para a ligação de argamassas e concretos de cimento e para injeções. (PETRUCCI, 1976)

#### 2.4.5 Resíduos de Produção de Cal

São resíduos da indústria calcária da produção de cal para construção civil, obtida pela calcinação do calcário, constituído essencialmente de cal e elementos, não calcários ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - alumina,  $\text{SiO}_2$  - sílica,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – óxido de ferro, etc.) em quantidade totais maiores do que 12% segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003). Sendo constituídos essencialmente de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

Quanto à classificação comercial são:

- Cal virgem ( $\text{CaO}$  - cal viva;
- Cal sem apagar;
- Cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$  - cal apagada, cal extinta).

Os resíduos da produção de cal podem ser utilizados como material na construção civil, porém ressalta-se que há perda da reatividade ao longo do tempo, daí a recomendação de emprego logo após a produção, evitando-se o armazenamento prolongado.

O aproveitamento da cal residual como aglomerante depende das suas características a serem determinadas em laboratório, tomando-se como referência os requisitos e critérios da especificação para a cal industrial.

#### 2.4.5.1 Composição Química

O material residual empregado é constituído de óxido de cálcio não hidratado (CaO), hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), restos de carbonato de cálcio e magnésio não queimados (CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub>), óxido de magnésio não hidratado (MgO) e traços de óxidos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc. Neste trabalho foi utilizado somente um tipo de resíduo de produção de cal de uma empresa do Paraná. Um fator importante é a quantidade de calcário não queimado, cerca de 18,54% no resíduo utilizado.

A definição pelo seu uso foi baseada em dois itens: suas propriedades aglomerantes e sua disponibilidade em grande quantidade; além, é claro, de minimizar seu impacto junto ao meio ambiente. A relação da quantidade de resíduos gerados e a estimativa de resíduos da produção de cal com menor teor de calcário são, aproximadamente, 10 ton/mês, e com maior teor de calcário – 20 ton/mês.

### 2.5 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são materiais obtidos de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais como: distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface (PADILHA 2007).

Muitos destes materiais são compostos por apenas duas fases; uma chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase, chamada freqüentemente de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Nesse contexto, por “geometria da fase dispersa” subentende-se a forma das partículas, tamanho, distribuição e sua orientação. O concreto é constituído por areia e brita (particulados), cimento e água (fase matriz) é considerado um compósito comum com partículas grandes.

Para atingir a resistência e a operacionalidade de uma mistura de concreto, os insumos devem ser adicionados nas proporções corretas. O empacotamento denso do agregado e um bom contato interfacial são obtidos ao se ter partículas com dois tamanhos diferentes; as partículas finas de areia devem preencher os

espaços vazios entre as partículas de brita. Normalmente, esses agregados compreendem entre 60 a 80% do volume total. A quantidade da pasta de cimento-água deve ser suficiente para cobrir todas as partículas de areia e brita, de outra forma a ligação de cimentação será incompleta; enquanto água em excesso resulta em uma porosidade excessiva. Em ambos os casos, a resistência do produto final é inferior à ótima.

De acordo com JOHN (2000), somente a aplicação de conceitos de Ciência dos Materiais, combinando química, microestrutura, com reologia e mecânica da fratura, associados com uma maior padronização de variáveis experimentais relevantes como energia de lançamento, poderão esclarecer pontos ainda obscuros no longo prazo.

## 2.6 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 2.6.1 Objetivo Geral

Identificar as melhores composições para a fabricação de tijolos à base de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e Resíduos de Produção de Cal (RPC) ou cal de mercado (virgem).

### 2.6.2 Objetivos Específicos

- Estudar as composições: química, mineralógica e granulométrica dos componentes (RCD, RPC e cal virgem) usados como matérias-primas dos novos materiais desenvolvidos nesta pesquisa;
- Pesquisar as mudanças nas propriedades mecânicas de diferentes composições de RCD/ RPC e de RCD/cal virgem após a cura ao ar livre;
- Estudar a eficiência da substituição de RPC por cal virgem de mercado, devido à possível ausência local deste material;
- Estudar os processos físico-químicos, nas diferentes etapas de formação das estruturas das composições com os maiores valores de resistência;
- Desenvolver tecnologias de produção do novo compósito em nível de usina piloto.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

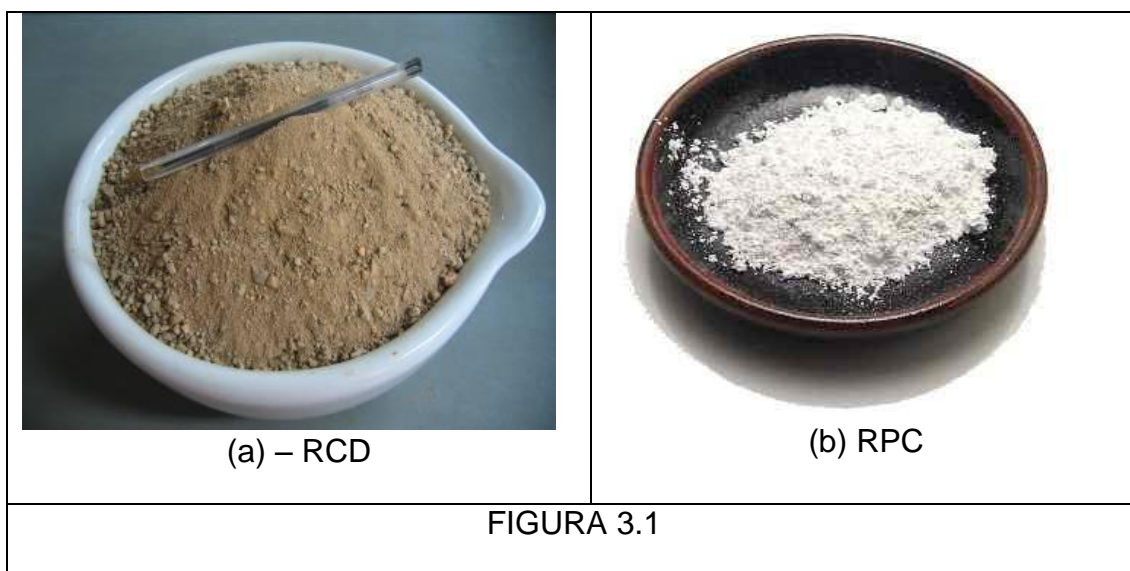
Os métodos adotados para se alcançar os objetivos definidos encontram-se descritos na sequência:

- Coleta – as amostras de RCD foram coletadas já trituradas em moinho de mandíbula, na granulometria de areia grossa (entre 0,6 mm e 2,0 mm), conforme determina a NBR 7211/83, na empresa Ponta Grossa Ambiental na Região Metropolitana de Curitiba, e o RPC fornecido na forma em pó por uma empresa de Rio Branco do Sul, PR. A cal virgem foi adquirida no mercado varejista.
- Peneiramento – após moagem por 90 min em moinho-de-bola para obtenção de partículas com menor módulo de finura, o Resíduo de Construção e Demolição passou a ser peneirado em peneira 130  $\mu$ m. Os Resíduos da Produção da Cal passaram pela peneira de 150  $\mu$ m não passando pela trituração e moagem, tendo em vista o pequeno módulo de finura do material fornecido pelo fabricante. O objetivo do processo de peneiramento é ampliar a capacidade de ligação destes dois materiais.
- Secagem – ambos os resíduos (RCD e RPC) foram secos em estufa a 100 °C por 24 h.
- Pesagem – a pesagem dos materiais ocorreu conforme as composições definidas em balança de precisão com 2 casas decimais do grama.
- Mistura – após a pesagem de cada composição na forma de pó, estas foram misturadas em recipientes fechados.
- Hidratação – cada uma das composições teve um percentual definido de água adicionada, para efetuar a hidratação dos dois componentes e proporcionar a sua ligação. O tempo de espera definido para a hidratação foi de 40 min antes da compactação.
- Compactação – depois de decorrido o tempo de hidratação, as misturas foram compactadas em prensa manual com carga de 300 kgf.
- Cura – o processo empregado é o de cura a seco.

- Ensaio: resistência à compressão uniaxial em todas as etapas de endurecimento, dilatação durante a cura, resistência e absorção de água.
- Processos físico-químicos e formação de estruturas.

### 3.2 ESCOLHA DOS RESÍDUOS

A definição do uso de RCD, RPC e cal virgem, foi baseada inicialmente no levantamento bibliográfico, que evidenciou a não existência de trabalho onde tenha sido empregado RPC para ligar RCD e fabricar materiais de construção civil como tijolos ou blocos, o que torna este trabalho inédito.



### 3.3 DEFINIÇÃO DAS COMPOSIÇÕES

A escolha das composições que foram objeto deste trabalho foi decorrente dos estudos preliminares do orientador desta pesquisa (MYMRINE, 2005), onde diversas composições foram elaboradas, variando o percentual de cal, de RCD, de concreto e cimento CII-F32. Pelos resultados de resistência à compressão, algumas destas composições foram descartadas. A resistência à compressão chegou a 28 MPa.

Os resultados obtidos na pesquisa atendem a NBR 8953, contudo, não foram realizados testes com apenas dois tipos de resíduos: RCD e RPC ou Cal. Nesta



pesquisa, decidiu-se não fazer uso do cimento nas composições, tendo em vista o alto custo para a fabricação dos compósitos.

Após a realização dos testes preliminares, foram definidas oito composições, com variação de 5% de RCD e RPC ou cal virgem entre elas, conforme demonstrado na Tabela 3.1. A proporção de água usada para cada composição foi escolhida experimentalmente.

TABELA 3.1 - COMPOSIÇÕES TRABALHADAS

TEOR DE COMPONENTES EM % DE PESO					
Nº COMPOSIÇÃO	RCD%	RPC%	Nº COMPOSIÇÃO	RCD%	CAL VIRGEM %
1	85	15	5	85	15
2	80	20	6	80	20
3	75	25	7	75	25
4	70	30	8	70	30

Para cada uma das composições trabalhadas foram confeccionados 6 corpos de prova por idade. As idades trabalhadas foram: 3, 7, 14, 28, 60 e 90 e 180 dias, perfazendo um total de 336 cp's nas dimensões de 20 mm x 20 mm, em função do tipo de moldagem e equipamentos disponíveis, conforme demonstrado na Figura 3.2.



FIGURA 3.2 – CORPO DE PROVA

O molde utilizado na confecção dos cp's foi fabricado em aço, material não absorvente e quimicamente inerte frente aos resíduos trabalhados, com as dimensões internas de 20 x 60 mm, conforme figura 3.3. Tendo em vista os recursos disponíveis, foi utilizada uma prensa manual para a compactação dos cp's. A

pressão empregada para a compactação foi de 300 kgf de carga para diâmetro de molde cilíndrico 20 mm resultando em 9,6 MPa como na figura 3.4.



FIGURA 3.3 – MOLDE UTILIZADO NA COMPACTAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA



FIGURA 3.4 – PRENSA MANUAL MARCA SCHULTZ CAPACIDADE DE 15 TONELADAS.

### 3.4 ENSAIOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Durante a execução da parte experimental desta pesquisa fez-se uso dos seguintes métodos disponíveis:

1. Determinação dos valores de resistência à compressão uniaxial durante todas as etapas de endurecimento (cura). Os ensaios foram realizados na prensa INSTRON 4476, com uma velocidade definida de 1 mm/min. Por ser uma propriedade de grande importância na engenharia civil, a resistência à compressão traduz de certa forma a

qualidade do material, pois está diretamente relacionada à sua estrutura interna. Os valores obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova fornecem seu desempenho em termos mecânicos e conseqüente durabilidade.

$$f_{cj} = \left( \frac{A}{B} \right)^x \text{ Equação de Abrams}$$

Onde:  $f_{cj}$  = resistência à compressão à idade de j dias;

x = relação água/cimento;

A = constante empírica;

B = constante que depende do tipo de aglomerante e da idade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).



FIGURA 3.5 – PRENSA INSTRON 4476,

2. Estudo de resistência à água durante todas as etapas de endurecimento (cura);
3. Absorção de água na idade de 28 dias das amostras. Os resultados do ensaio de absorção de água, no 28º dia de cura, foram obtidos com a secagem preliminar das amostras em estufa a 100°C, por um período de 72 horas, seguida da imersão em água fervente por 5 horas. A diferença percentual entre o peso seco e o peso após a imersão final, representa o valor de absorção de água. Para o ensaio, foram empregados 3 cp's para cada uma das 4 composições, conforme definido na norma NBR 9778 e o uso da equação:

$$Abs_{cp} = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \times 100$$

Onde:  $M_{sat}$  = massa do cp saturado

$M_s$  = massa do cp seco em estufa

4. Dilatação das amostras em todas as etapas de cura;

### 3.5 PROCESSOS DE INTERAÇÕES FÍSICO-QUÍMICOS E FORMAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Os ensaios de processos de interações físico-químicos e formação das estruturas de novos materiais incluem os seguintes métodos:

1. Fluorescência de Raios-X – FRX;
2. Análise de Espectrofotometria de Absorção Atômica – AEAA (ambos de composição química);
3. Difratometria de Raios-X – DRX (composição mineralógica) foi realizado no Difratometro modelo PW 1710 da marca Philips ilustrado na figura 3.6, através de método pó. Nesta análise a radiação usada foi de Cu; tensão de 40 kV; corrente de 30 mA, o ângulo  $2\theta$  variou de  $5^\circ$  a  $70^\circ$ , passo =  $0,02^\circ$ , tempo/passo  $2^\circ$ .



FIGURA 3.6 – DIFRATÔMETRO DE RAIOS-X (DRX).

4. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV foram utilizadas amostras de superfície de fratura dos cp's nos ensaios de resistência à compressão. Utilizou-se o MEV de marca JEOL JSM 6360LV, com capacidade de aumento

de 50 a 300.000 vezes e as imagens obtidas foram registradas em arquivo digital.



FIGURA 3.5 – AMOSTRAS PREPARADAS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MEV.

#### 5. Método de Calcimeter – através de ensaio de Determinação do Teor de Carbonatos.

Os processos de interações físico-químicos acima nomeados foram realizados apenas nas amostras das composições 4 e 8 da Tabela 3.1, de todas as idades de hidratação e endurecimento após compactação em laboratório, por apresentarem os maiores teores de ligantes (RPC ou Cal virgem).

Para a realização dos ensaios de DRX e FRX das matérias-primas e do novo material desenvolvido, foi utilizado um pó fino, obtido a partir da moagem dos mesmos em moinho de tungstênio e secagem no vácuo.

A técnica de DRX oferece um modo conveniente para determinar a análise mineralógica dos sólidos cristalinos. Se um mineral é exposto a raios X de um comprimento de onda específico, as camadas de átomos difratam os raios e produzem um padrão de picos que é característico do mineral. A escala horizontal (ângulo de difração) de um padrão DRX típico fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado. Quando a amostra bombardeada com raios X tem mais de um mineral, a intensidade de picos característicos dos minerais individuais é proporcional às suas quantidades (MYNRINE, 2005).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ESTUDO DO RCD

#### 4.1.1 Composição Química Através de FRX

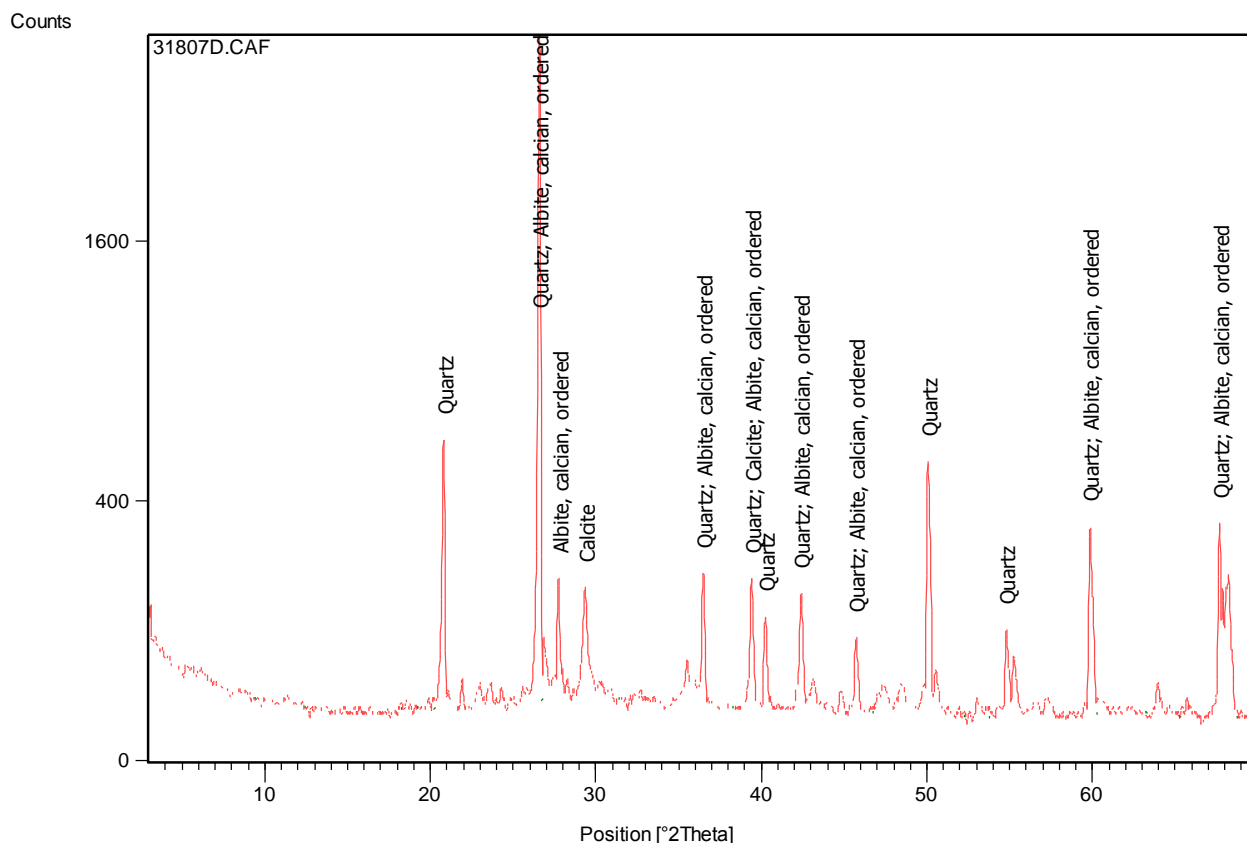
Conforme pode-se observar na Tabela 4.1, o RCD possui uma maior concentração de elementos como:  $\text{SiO}_2$  - 67,02%,  $\text{CaO}$  - 11,54%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 6,3% e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 3,85% e  $\text{MgO}$  - 1,37%. Os teores dos outros elementos são inferiores a 1%. Com um teor relativamente baixo de  $\text{CaO}$ , especialmente em comparação com RPC especificado na tabela 4.2, não se espera propriedades ligantes de RCD. Mas, como um componente de mistura com ligante do tipo Cal ou cimento Portland, este teor de  $\text{CaO}$  (11,54%) oferece maior vantagem em comparação com areia ou outro tipo de rocha natural.

TABELA 4.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RCD POR FRX.

ELEMENTO	RCD	
	(%)	Erro
$\text{SiO}_2$	67,02	0,1
$\text{CaO}$	11,54	0,06
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,3	0,03
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,85	0,03
$\text{MgO}$	1,37	0,02
$\text{K}_2\text{O}$	0,67	0,01
$\text{SO}_3$	0,58	0,02
$\text{Na}_2\text{O}$	0,29	0,01
$\text{TiO}_2$	0,64	0,01
Sr	0,03	0,003
Ba	-	0,002
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,11	0,005
P.F.	7,57	-
C	-	-
Total	100	-

#### 4.1.2 Composição Mineralógica Através de DRX

O estudo da composição mineralógica de RCD utilizado através da Difratometria de Raio-X (Figura 4.1) demonstra coincidência com os resultados de Fluorescência de Raios-X, pois foi confirmada a presença de Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Albite com o aumento do teor de Cálcio ( $\text{Na,Ca}$ )  $(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$  e Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).



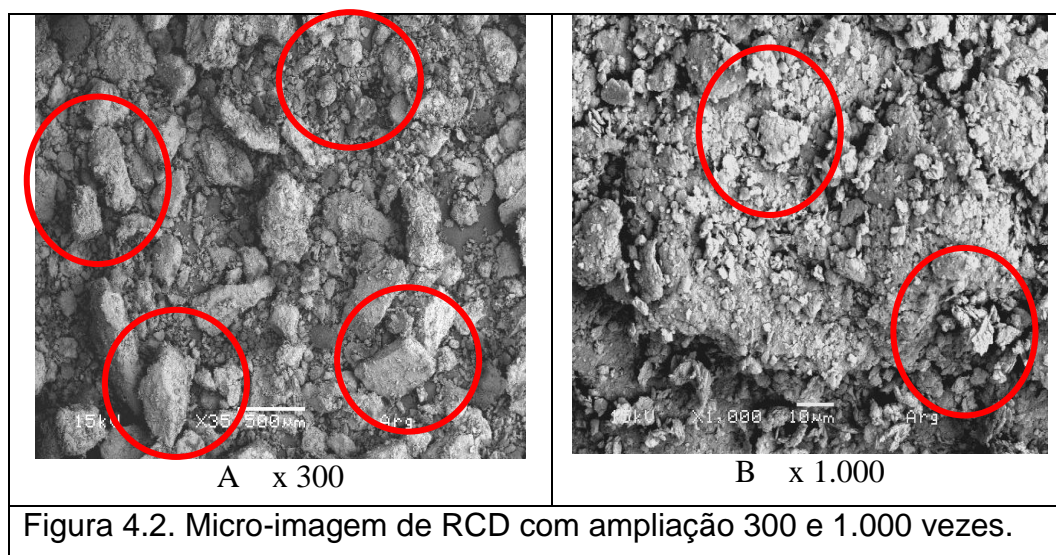
Código	Minerais	Formula química
78-2315	Quartzo	$\text{SiO}_2$
86-2339	Calcita	$\text{CaCO}_3$
20-0548	Albite calciana	$(\text{Na,Ca}) (\text{Si,Al})_4\text{O}_8$
75-0449	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$

FIGURA 4.1 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X DA AMOSTRA DE RCD

#### 4.1.3 Morfologia através de MEV

A pesquisa de amostra de RCD através de MEV (Figura 4.2 A) demonstra grande diferença de dimensões das partículas. Entre eles existem peças de diferentes formatos: acutângulos, redondos, ortogonais, esféricos, agulhados, etc.

Não se observa nenhum tipo de aglutinação entre eles, pois todas as partículas estão completamente desordenadas. Contudo, são visíveis poros de diferentes formas e tamanhos (Figura 4.2 B).



## 4.2 ESTUDO DO RPC

### 4.2.1 Composição Química Através de FRX

TABELA 4.2 - ENSAIO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE RPC POR FRX

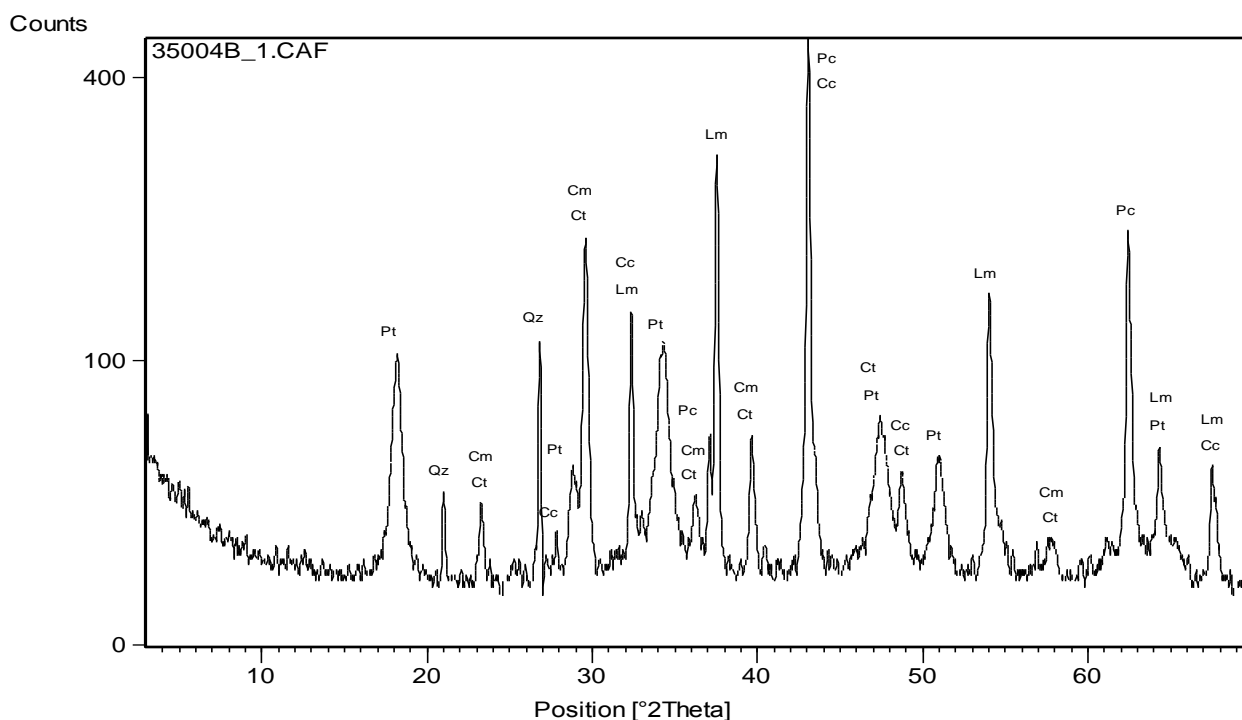
ELEMENTO	RPC	
	(%)	Erro
SiO <sub>2</sub>	2,82	0,02
CaO	47,69	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,008
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24	0,008
MgO	33,10	0,06
K <sub>2</sub> O	0,05	0,002
SO <sub>3</sub>	0,03	0,002
Na <sub>2</sub> O	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,003
Sr	0,03	0,001
Ba	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,001
P.F.	-	-
C	15,74	
Total	100	-



A análise de dados por FRX da Tabela 4.2 demonstra que contrário ao RCD, a amostra do RPC consiste principalmente de CaO e MgO com teor total 80,79%. O teor de impurezas na Cal como SiO<sub>2</sub>, Al, Mn, K e Na, analisadas por AEAA, etc. é igual a 22,37%. Portanto, acima dos 12% estabelecidos pela a NBR 6453:2003.

Este material é classificado como RPC, e a empresa produtora desta Cal como ligante, classificou-o como rejeito de fabricação, não podendo ser usado como ligante pela construção civil no Brasil. O teor de carbonatos de cálcio e magnésio (CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>) encontrado no RPC trabalhado é de 18,54%, determinado através do ensaio no Calcimeter – aparelho de Determinação do Teor de Carbonatos.

#### 4.2.2 Composição Mineralógica Através de DRX



Minerais	Fórmula Química
Cal (Lm)	CaO
Periclásio (Pc)	Mg O
Portlandita (Pt)	Ca(OH) <sub>2</sub>
Calcita (Ct)	CaCO <sub>3</sub>
Quartzo (Qz)	SiO <sub>2</sub>
Carbonato de Cálcio e Magnésio (Cm)	(Ca,Mg)CO <sub>3</sub>
Carbeto de Cálcio (Cc)	CaC <sub>2</sub>

FIGURA 4.2 – DIFRATOGRAMA DE RAO X DO RPC

Estudando a composição mineralógica do RPC através do método de DRX (Figura 4.3) verifica-se que o material residual empregado é constituído de óxido de cálcio não hidratado ( $\text{CaO}$ ), hidróxido de cálcio Portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , restos de carbonato de cálcio e magnésio não queimados ( $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ), óxido de magnésio não hidratado, Periclásio –  $\text{MgO}$ , Calcita -  $\text{Ca (CO}_3\text{)}$  - Carbonato de Cálcio e Magnésio -  $(\text{Ca, Mg})\text{CO}_3$ , Quartzo -  $\text{SiO}_2$ . Foi identificado também, um mineral bastante raro - Carbetto de Cálcio -  $\text{CaC}_2$  – produto da queima de Calcário em fogo aberto.

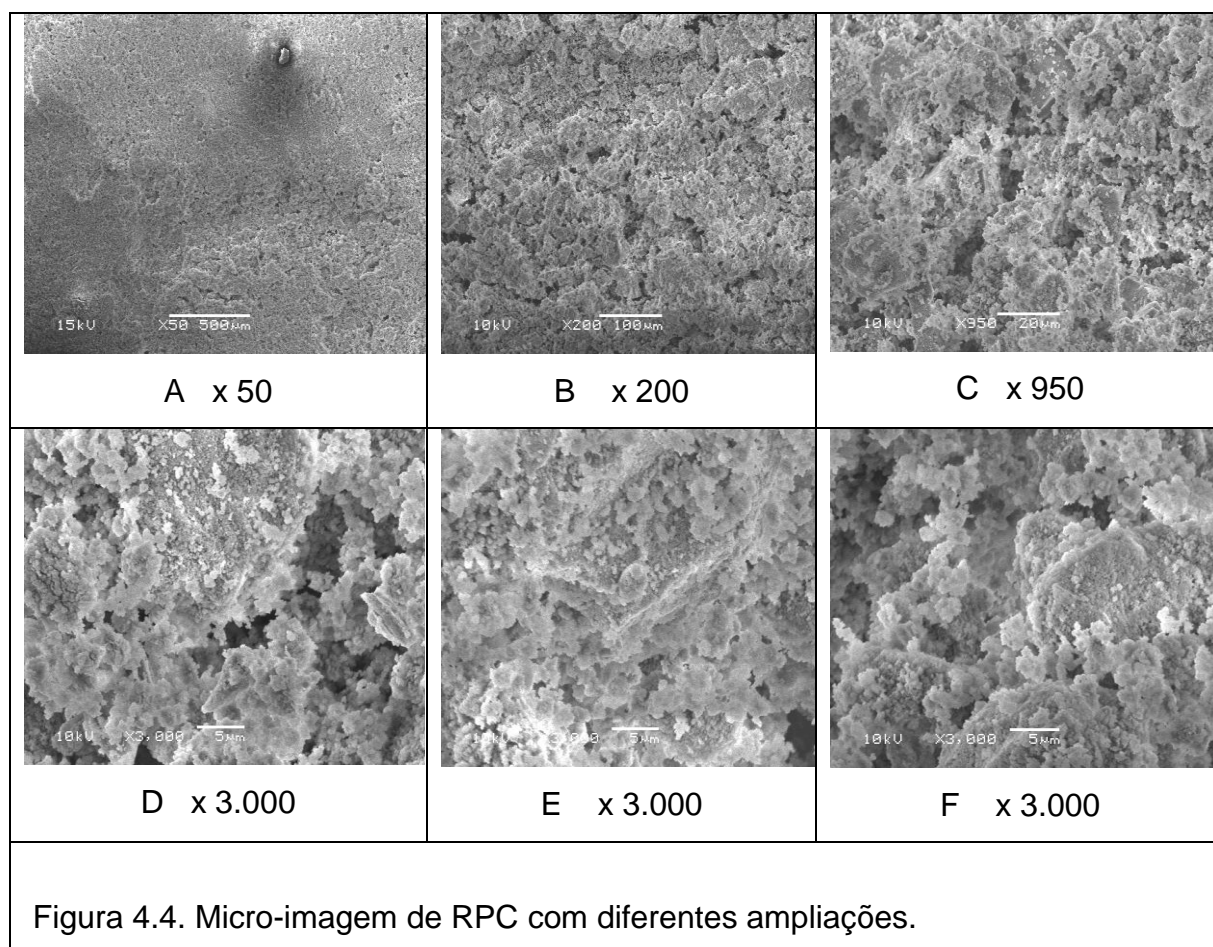
#### 4.2.3 Morfologia do RPC Através de MEV

A pesquisa de morfologia das estruturas do RPC através de MEV (Figura 4.4) demonstra que as partículas dessa matéria-prima possuem também diferentes formas e tamanhos, sendo a mais comum, a de partículas com formações arredondadas, sem ângulos pontiagudos.

Estas formas estão quase invisíveis nas ampliações menores (x50, x200 até x950), mas bastante visíveis na ampliação 3.000 vezes como é possível verificar nas Figuras 4.4 – D, E, e F. Sem dúvida, a cobertura dessas formas é produto de absorção de água e de  $\text{CO}_2$  de ar. Na ampliação 50(x) na figura 4.4, é possível visualizar uma superfície lisa, uniforme, sem elevações e uma rede de poros irregulares. Já na ampliação 200 (x), estes poros são mais visíveis com formatos irregulares, não possuindo formas cristalinas muito visíveis com extremidades assimétricas.

As formações assimétricas são mais visíveis nas ampliações 950(x) e 3000(x), mais especificamente, onde as formações parecem amorfas.

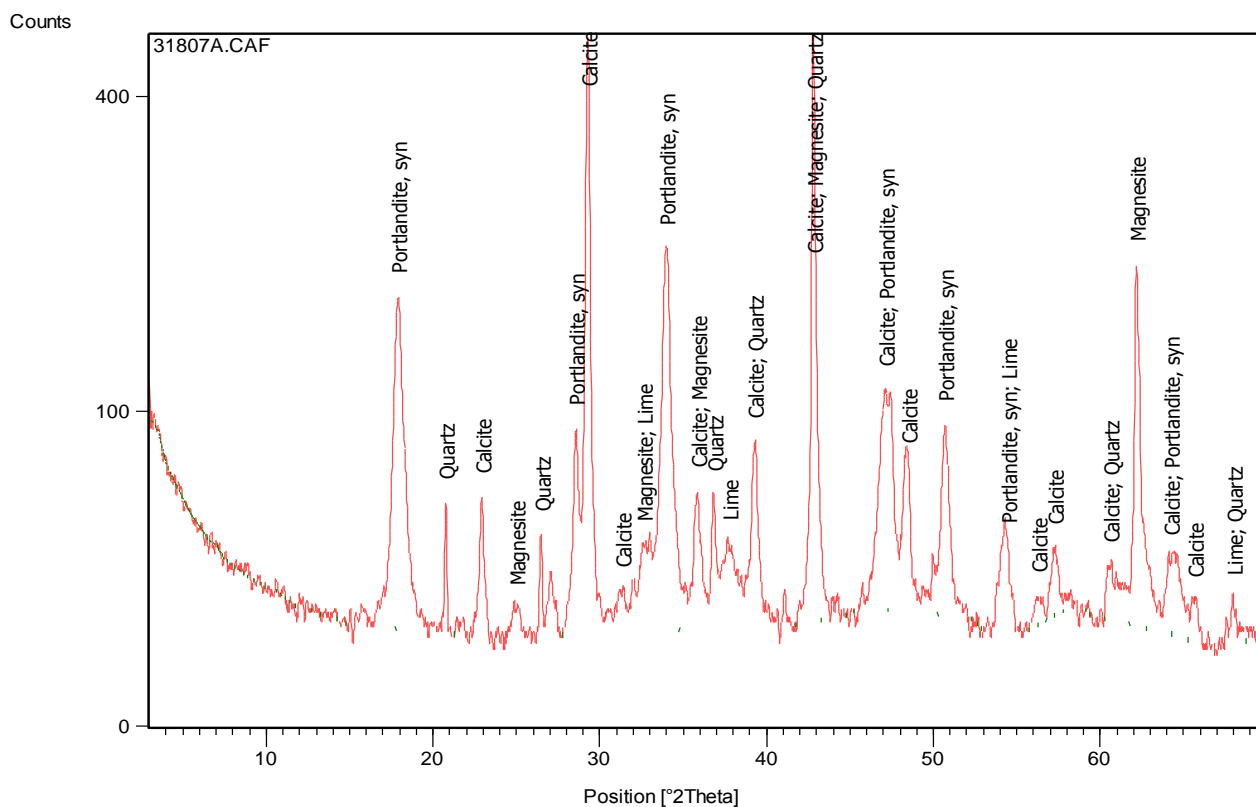
Os resultados de DRX (Tabela 4.3) confirmam essa idéia através da existência de tais minerais como Portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$ , Calcita  $\text{CaCO}_3$ , Carbonato de Cálcio e Magnésio  $(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$  – que são produtos da hidratação e carbonização da Cal virgem.



### 4.3 ESTUDO DA CAL VIRGEM DE MERCADO.

#### 4.3.1 Composição mineralógica através de DRX

O ensaio de composição mineralógica da Cal virgem através da Difractometria de raios-X (Figura 4.5) verifica-se a presença dos seguintes minerais: Calcita,  $\text{CaCO}_3$ , Portlandita,  $\text{Ca(OH)}_2$ , Magnesita,  $\text{MgCO}_3$  e Quartzo,  $\text{SiO}_2$ . Sabendo que o limite mínimo de sensibilidade do método de RXD é de 5%, isso significa que a amostra de Cal virgem também não corresponde às demandas de NBR 6453:2003 à Cal como material ligante de construção civil.



Código de referencia	Minerais	Formula química
72-1652	Calcite	$\text{CaCO}_3$
44-1481	Portlandita, syn	$\text{Ca(OH)}_2$
71-1534	Magnesita	$\text{MgCO}_3$
74-1226	Cal	$\text{CaO}$
82-0511	Quartzo	$\text{SiO}_2$

FIGURA 4.3 – DIFRATOGRAMA DE RAO X DA CAL VIRGEM

## 4.4 NOVOS COMPÓSITOS

### 4.4.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL À BASE DE RCD COM RPC

Para avaliar as propriedades durante o desenvolvimento de novos materiais foram executadas pesquisas pelos seguintes métodos:

1. Determinação de valores de resistência à compressão uniaxial durante a cura até 180 dias;
2. Estudo de resistência à água de amostras na idade de 28 dias;
3. Absorção de água das amostras na idade de 28 dias;
4. Dilatação das amostras em todas as etapas da cura;

#### 4.4.1.1 Resistência à Compressão

Por ser uma propriedade de grande importância na engenharia civil, a resistência à compressão traduz de certa forma a qualidade do material, pois os valores obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova avaliam seu desempenho em termos mecânicos e conseqüente durabilidade.

Foram estudados cinco cp's por idade, para cada composição. Na tabela 4.6, estão os resultados do ensaio compressão para as composições.

Nº	Teor de RPC, % de peso	Parâmetros Estatísticos	Resistência uniaxial (MPa) na idade (dias)					
			3	7	28	60	90	180
1	15	Média	2,2	5,7	5,4	9,8	8,9	12,3
		Desvio Padrão	0,6	0,7	1,4	1,2	1,3	0,7
2	20	Média	2,9	6,2	8,1	12,3	10,4	13,8
		Desvio Padrão	1,2	1,6	1,5	2,2	1,1	0,9
3	25	Média	3,8	7,2	8,7	11,6	10,3	14,5
		Desvio Padrão	1,1	1,3	0,7	1,5	1,6	1,2
4	30	Média	4,0	7,9	9,3	13,4	10,4	15,6
		Desvio Padrão	1,5	1,2	1,5	1,7	2,1	1,2

TABELA 4.3 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO RCD COM RPC

Conforme a NBR 7170 (1983) as resistências uniaxiais dos tijolos maciços queimados devem ser as seguintes: Classe A  $< 2,5$  MPa,  $2,5 < \text{Classe B} < 4,0$  MPa, Classe C  $> 4,0$  MPa. Comparando os resultados obtidos com as demandas da NBR 7170, nota-se que a resistência dos materiais desenvolvidos com teor de 15% de RPC atende a norma a partir do 7º dia de cura e continua a aumentar até o valor de 12,3 MPa no 180º dia de hidratação. As amostras com o teor de RPC de 20, 25 e 30% demonstram ainda melhores resultados, atendendo aos requisitos da NBR já no 3º dia de cura.

Os valores da resistência de todos os materiais da Tabela 4.6 demonstram uma queda temporária de resistência no 90º dia de cura. Este tipo de queda foi detalhadamente pesquisado nos trabalhos de MYMRINE (1968, 1981, 1990, 1994) como decorrente das etapas de modificação das estruturas dos materiais, através de processos de envelhecimento de gel de novas formações em poros de material com o aumento de densidade de substâncias amorfas. Ao mesmo tempo, continua a transformação de substâncias amorfas em formas cristalinas e o aperfeiçoamento de suas redes. A combinação destes fatores pode conduzir a uma diminuição temporária de resistência mecânica.

#### 4.4.1.2 Resistência à Água

A análise de resistência à água de amostras no 28º dia de cura após 24 horas de completa saturação em água, Tabela 4.7, demonstra um aumento dos valores de coeficiente de resistências à água, (CA) de 0,73 até 0,90, com aumento do teor ligante. Isso significa a perda de resistência de materiais entre 27% ( $100 - 73$ ) na composição com 15% de RPC e 10% ( $100 - 90$ ) na composição com teor de 30% de RPC, como resultado da imersão completa das amostras secas em água.

TABELA 4.4 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA À ÁGUA (CA) NO 28º DIA DE CURA

RPC, % de peso	R <sub>28</sub> “seco”, MPa	R <sub>28</sub> úmido, MPa	C <sub>A</sub>
15	5,4	3,9	0,73
20	8,1	6,6	0,81
25	8,7	7,3	0,84
30	9,3	8,4	0,90

## 4.4.1.3 Absorção de Água

TABELA 4.5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

RPC, % de peso	Parâmetros Estatísticos	Idade 28 dias		Cálculos
		Peso seco após 72 hrs., g	Peso úmido após 5 hrs. de fervura, g	C abs, % de peso
15	Média	13,42	14,48	7,87
	Desvio Padrão	0,28	0,32	
20	Média	13,28	15,91	8,91
	Desvio Padrão	0,39	0,38	
25	Média	13,14	14,37	9,36
	Desvio Padrão	0,27	0,39	
30	Média	12,95	14,28	10,25
	Desvio Padrão	0,18	0,25	

Segundo a NBR 6163, o valor máximo permitido para a absorção média em blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural é de 10%, ou seja, somente materiais com 15, 20 e 25% de RPC podem ser aproveitados na prática da construção civil. Contudo, essas normas foram desenvolvidas para materiais à base de cimento Portland com agregados de rochas naturais, com valores de porosidade muito menores do que os componentes principais de RCD: tijolos, argamassas, concretos, etc. Esse fato dificulta a comparação de materiais desenvolvidos com concretos convencionais.

Materiais com elevados índices de absorção interferem nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos e argamassas quando não previamente saturados. Uma proposta de normalização brasileira (LIMA, 2000) indica aplicações para as quais os valores limites de absorção de água podem ser superiores a 17%; tais como: contra-pisos, blocos, etc.

#### 4.4.1.4 Coeficiente de Dilatação

Analisando os dados de mudança de valores de dilatação de RCD com RPC na Tabela 4.9, durante a hidratação e cura de amostras de diferentes composições observa-se que todos demonstram diferentes resultados imediatamente após a compactação das amostras (dia 1). Os números aumentam com o crescimento de teor de ligante (RPC) e com a diminuição de teor de RCD. Isso significa que, o RPC na primeira etapa de hidratação tem maior flexibilidade do que o RCD e que este apresenta propriedades mais próximas de rochas naturais do que o RPC.

TABELA 4.6 – COEFICIENTE DE DILATAÇÃO DE AMOSTRAS DE RCD/RPC

RPC, % de peso	Parâmetros Estatísticos	Coeficiente de dilatação (%) na idade (dias)						
		1	3	7	28	60	90	180
15	Média	0, 87	0,81	0,73	0,66	0,53	0,59	0,31
	Desvio Padrão	0,25	0,33	0,37	0,49	0,52	0,63	0,29
20	Média	0, 98	0,84	0,62	0,51	0,33	0,39	0,28
	Desvio Padrão	0,23	0,28	0,34	0,42	0,37	0,51	0,26
25	Média	1,18	1,08	1,00	0,72	0,35	0,44	0,27
	Desvio Padrão	0,28	0,26	0,39	0,79	0,53	0,83	0,51
30	Média	1,35	1,23	0,98	0,73	0,29	0,47	0,23
	Desvio Padrão	0,18	0,27	0,31	0,43	0,27	0,57	0,21



Com o tempo de cura, os valores de dilatação diminuem progressivamente até 60° dia, contudo, no 90° dia, há um aumento temporário, para, em seguida, diminuir novamente até o 180° dia. Esse fato coincide com a queda da resistência mecânica também no 90° dia, conforme a Tabela 4.6, e confirma o evento de reconstrução de estruturas de materiais, anteriormente explicado.

#### 4.4.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL À BASE DE RCD COM CAL VIRGEM

##### 4.4.2.1 Resistência à Compressão

Para comparar as propriedades ligantes do RPC com Cal virgem e a influência dessa diferença nas propriedades mecânicas de novos materiais à base de RCD, foi executada a pesquisa, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.10. A comparação de dados destas Tabelas demonstra a semelhança dos processos de endurecimento dos materiais com RPC e cal virgem, com significativa diferença em números. A resistência do 3° dia de todas as composições com cal virgem é significativamente maior do que com RPC.

TABELA 4.7 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE RCD/CAL VIRGEM

Teor de cal virgem (%)	Parâmetros Estatísticos	Resistência uniaxial (MPa) na idade (dias)					
		3	7	28	60	90	180
15	Média	4,6	2,2	3,9	6,9	6,9	12,5
	Desvio Padrão	1,1	1,5	1,4	1,2	1,5	0,9
20	Média	4,9	3,7	5,7	11,3	11,1	14,0
	Desvio Padrão	1,4	1,8	1,9	2,1	1,7	1,1
25	Média	5,5	4,8	5,7	11,8	10,2	15,8
	Desvio Padrão	1,5	1,8	1,3	1,7	1,0	1,3
30	Média	5,3	5,1	7,2	12,9	12,0	16,9
	Desvio Padrão	1,8	1,5	1,1	1,0	1,7	1,1

Na idade de 180 dias, os materiais com RPC restabelecem uma pequena vantagem de materiais com maiores propriedades ligantes em comparação com os

de Cal virgem. Este fato pode ser explicado pela existência de maior teor (18,54%) de carbonatos na composição química, especialmente na forma amorfa, de RPC em comparação com Cal virgem. Nesta situação, o processo de formação das estruturas novas, principalmente de carbonatos, pode acontecer mais rápido e fortalecer as amostras em menos tempo. Na idade de 180 dias e provavelmente também depois, perde-se esta vantagem e a resistência com Cal virgem prevalece. A queda temporária de resistência de materiais aparece na mesma idade das amostras; isto é, no 90º dia de hidratação.

#### 4.4.2.2 Resistência à Água

A análise de resistência de amostras no 28º dia (Tabela 4.8) demonstra um crescimento dos valores de coeficiente de resistências à água, ( $C_A$ ) de 0,82 até 0,93 com aumento do teor ligante. Isso significa a perda de valores de resistência de materiais entre 18% (100 – 82) e 7% (100 – 93) como resultado da completa imersão das amostras secas em água, versus 27% (100 - 0,73) – 10% (100 - 0,90) de materiais com RPC (Tabela 4.5).

TABELA 4.8 – COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA À ÁGUA ( $C_A$ ) NO 28º DIA DE CURA DO RCD/CAL VIRGEM

<b>Cal virgem % de peso</b>	<b>R<sub>28</sub> “seco”, MPa</b>	<b>R<sub>28</sub> úmido, MPa</b>	<b>C<sub>A</sub></b>
<b>15</b>	3,9	3,2	0,82
<b>20</b>	5,7	5,0	0,88
<b>25</b>	5,7	5,2	0,91
<b>30</b>	7,2	6,7	0,93

#### 4.4.2.3 Absorção de Água

Os valores de absorção de água de materiais à base de RCD com Cal virgem como material ligante (Tabela 4.8), não apresentaram diferenças significativas como o esperado, em relação ao material com RPC como ligante (Tabela 4.4).

Os valores para cada composição são significativamente menores pela maior quantidade de cal não hidratada em Cal virgem do que em RPC. Segundo Sales, Cordeiro e Souza (2004), o material reciclado de alvenaria apresenta absorção maior que o concreto, pois em geral são mais porosos. Por isso os valores de absorção de água em amostras de RCD com Cal virgem variam entre 8,71 e 10,65% versus 7,87 e 10,25% de materiais RCD com RPC.

TABELA 4.9 – ABSORÇÃO DE ÁGUA DO RCD/CAL VIRGEM

Teor de cal virgem, % de peso	Parâmetros Estatísticos	Idade 28 dias		Cálculos
		Peso seco após 72 hrs., g	Peso úmido após 5 hrs. de fervura, g	C abs, % de peso
15	Média	13,21	14,36	8,71
	Desvio Padrão	0,14	0,26	
20	Média	13,05	14,24	9,15
	Desvio Padrão	0,34	0,35	
25	Média	12,92	14,20	9,87
	Desvio Padrão	0,71	0,56	
30	Média	12,64	13,99	10,65
	Desvio Padrão	0,44	0,59	

#### 4.4.2.4 Coeficiente de dilatação de materiais de RCD com Cal virgem

A diminuição de valores de coeficiente de dilatação é mais rápida nos materiais de RCD ou Cal virgem, do que com RPC sem o aumento de todos os valores no 90º dia de idade das amostras, como foi fixado na Tabela 4.9. Os valores deste coeficiente para os materiais com Cal virgem na idade 180 dias continuam ser maiores (entre 0,48 e 0,69%) do que com RPC (entre 0,21 e 0,31%).

Altos valores iniciais de coeficiente de dilatação de amostras de RCD com Cal virgem e suas mudanças durante a cura, confirmam a existência da propriedade elasticidade (flexibilidade), imediatamente após de compactação das amostras (dia 1), ainda maior do que de materiais com RPC.

TABELA 4.10 COEFICIENTE DE DILATAÇÃO DE AMOSTRAS DE RCD COM CAL VIRGEM.

Teor de Cal virgem, % de peso	Parâmetros Estatísticos	Coeficiente de dilatação (%) das amostras na idade (dias)						
		1	3	7	28	60	90	180
15	Média	1,34	1,15	0,92	0,84	0,62	0,65	0,48
	Desvio Padrão	0,72	0,61	0,59	0,75	0,45	0,36	0,21
20	Média	1,28	1,13	1,04	0,92	0,58	0,59	0,43
	Desvio Padrão	0,64	0,51	0,59	0,68	0,73	0,45	0,29
25	Média	1,45	1,33	1,12	0,94	0,65	0,72	0,54
	Desvio Padrão	0,67	0,66	0,28	0,34	0,45	0,34	0,31
30	Média	1,63	1,47	1,21	1,02	0,93	1,12	0,69
	Desvio Padrão	0,56	0,47	0,38	0,33	0,29	0,44	0,25

#### 4.4.3 PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS DE ENDURECIMENTO DOS MATERIAIS

Para investigar a formação de novas estruturas de materiais obtidos da homogenização, hidratação e compactação da mistura de RCD com RPC foram executadas as seguintes análises:

1. Difractometria de raios X (DRX), para controle de mudanças de composição mineralógica;
2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV), para pesquisa de morfologia de novas formações, responsáveis pelo crescimento dos valores de propriedades mecânicas.

#### 4.4.3.1 Difractometria de Raios –X (DRX) mistura seca de RCD com RPC

Foram comparados os difratogramas das amostras da composição 4 da Tabela 3.1 (a mistura de RCD com 30% de RPC seca) com a mesma composição hidratada durante 3, 7 e 30 dias. No difratograma da Figura 4.6, observa-se a presença de minerais, tais como Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e Albite ( $\text{Na}(\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$ ).

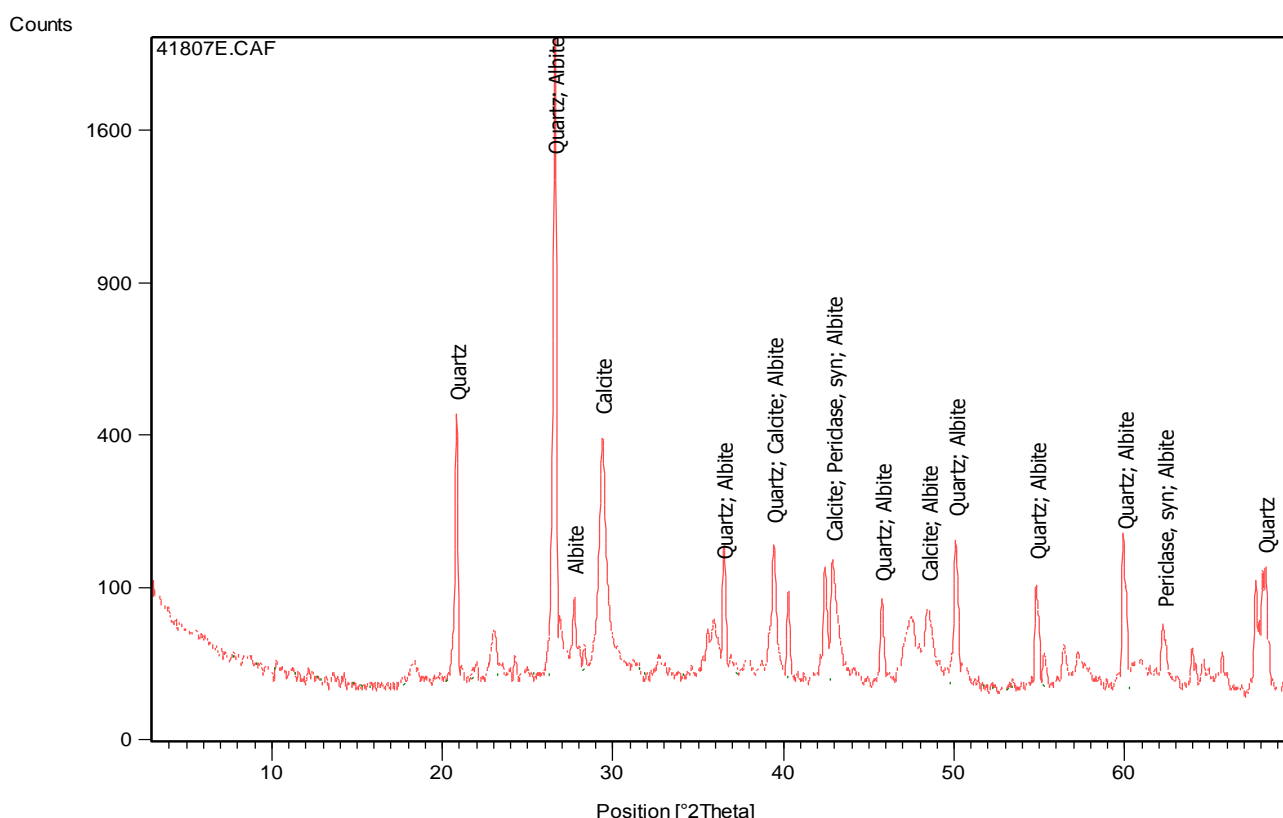


FIGURA 4.4 – DRX DA COMPOSIÇÃO 4 RCD/RPC

A interpretação dos difratogramas de raios X das amostras com grande quantidade de componentes minerais, não é exata, pois deve-se ter em conta que sua aplicação direta a sólidos de origem mineral apresenta o inconveniente pela sobreposição do espectro de um grande número de compostos para alguns picos. Não obstante esta dificuldade e possíveis imprecisões pode-se explicar a mudança de intensidade dos picos de maiores transformações, as quais acontecem durante a hidratação das composições e fortalecimento dos corpos de prova. No caso desta

pesquisa estas coincidências estão usualmente mascarando as intensidades de diferentes materiais e mudança deles com o tempo de cura.

Por essa razão, neste trabalho, foram separados alguns picos, que apresentam as menores quantidades de convergência dos minerais (Tabela 4.14). A comparação de intensidades de alguns picos de difratogramas de composição 4 nas diferentes idades de cura, demonstra um lento aumento de intensidades de pico com valor  $d = 4,8 \text{ \AA}$  da Brucita ( $\text{MgOH}_2\text{O}$ ) em razão do processo de hidratação de Periclasio ( $\text{MgO}$ ).

Nos difratogramas, estão livres de coincidência com os picos de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) de outros minerais, somente os picos com  $d=3,0$  e  $2,49 \text{ \AA}$ . A intensidade do primeiro deles cresce de 10,99 para 25,96%. O pico com  $d= 2,49 \text{ \AA}$ , aparece nos difratogramas somente no 7º dia com a intensidade de 2,18%, crescendo até 5,78% durante os 90 dias de cura.

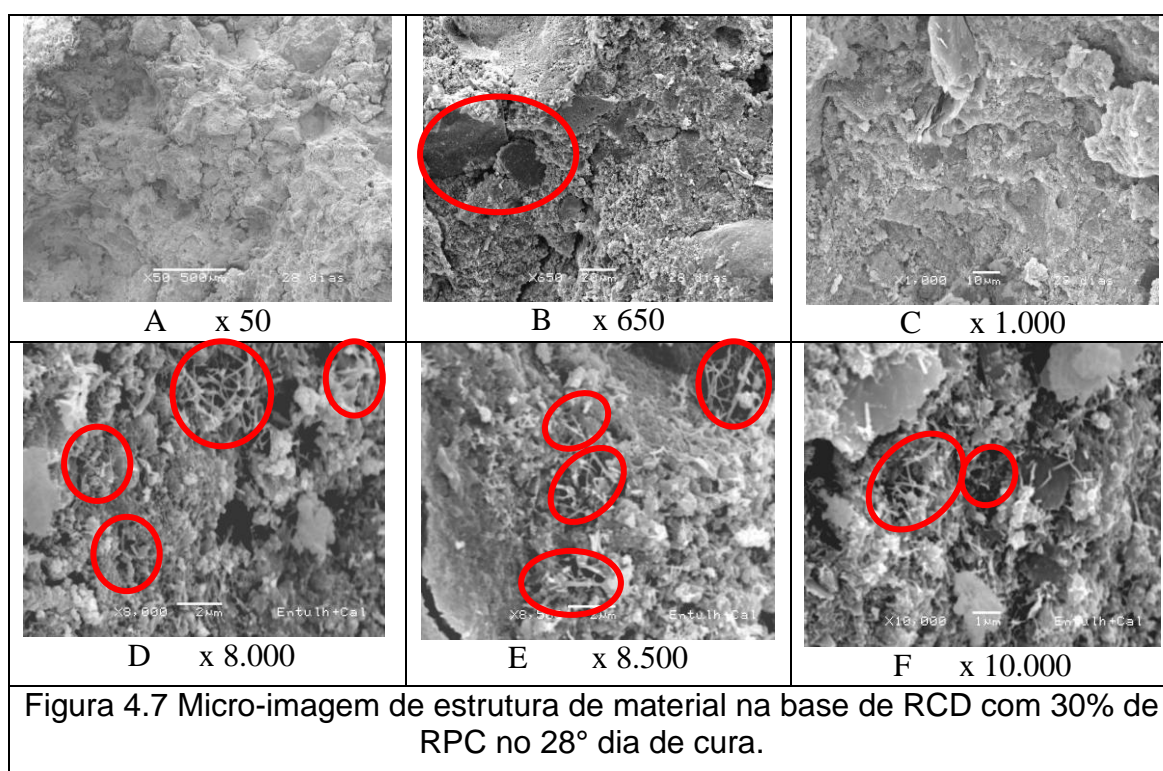
Existem três picos de Calcita com valores de  $d = 2,29 ; 1,98$  e  $1,88 \text{ \AA}$  com coincidência com outros minerais - Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ ) e Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Todos eles estão inertes no meio ambiente alcalino das amostras desta pesquisa. Por isso, todos os aumentos de intensidade dos mesmos devem ser explicados pelo crescimento da quantidade de cristais da Calcita e aperfeiçoamento das estruturas cristalinas da mesma durante a cura.

TABELA 4.11 – INTENSIDADE DE PICOS DE DRX

d, Å	Tempo de hidratação (dias)				Minerais
	3 Int., %	7 Int., %	30 Int., %	90 Int., %	
4,8	0,79	0,54	0,79	1,23	Brucita
3,0	10,99	18,11	20,88	25,96	Calcita
2,49	-	2,18	3,03	5,78	Calcita
2,29	7,13	8,14	9,42	12,04	Quartzo, Calcita
1,98	2,25	2,80	3,75	6,97	Quartzo, Albite, Calcita
1,88	2,05	2,87	3,87	5,39	Calcita, Cristobalita

#### 4.4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura da Mistura Seca de RCD e RPC 28° e 90° Dias

Para pesquisar as mudanças de estruturas morfológicas dos novos materiais, foram analisadas as amostras de RCD com o maior teor de RPC (30%), (composição 4 da Tabela 3.1) nas idades de 28 (Figura 7.2) e 90 dias (Figura 4.7).



Na ampliação A 50x é visível uma massa heterogênea, sem grande rede de poros, indicando que esta forma é sólida, sem separações entre as diferentes partículas do material.

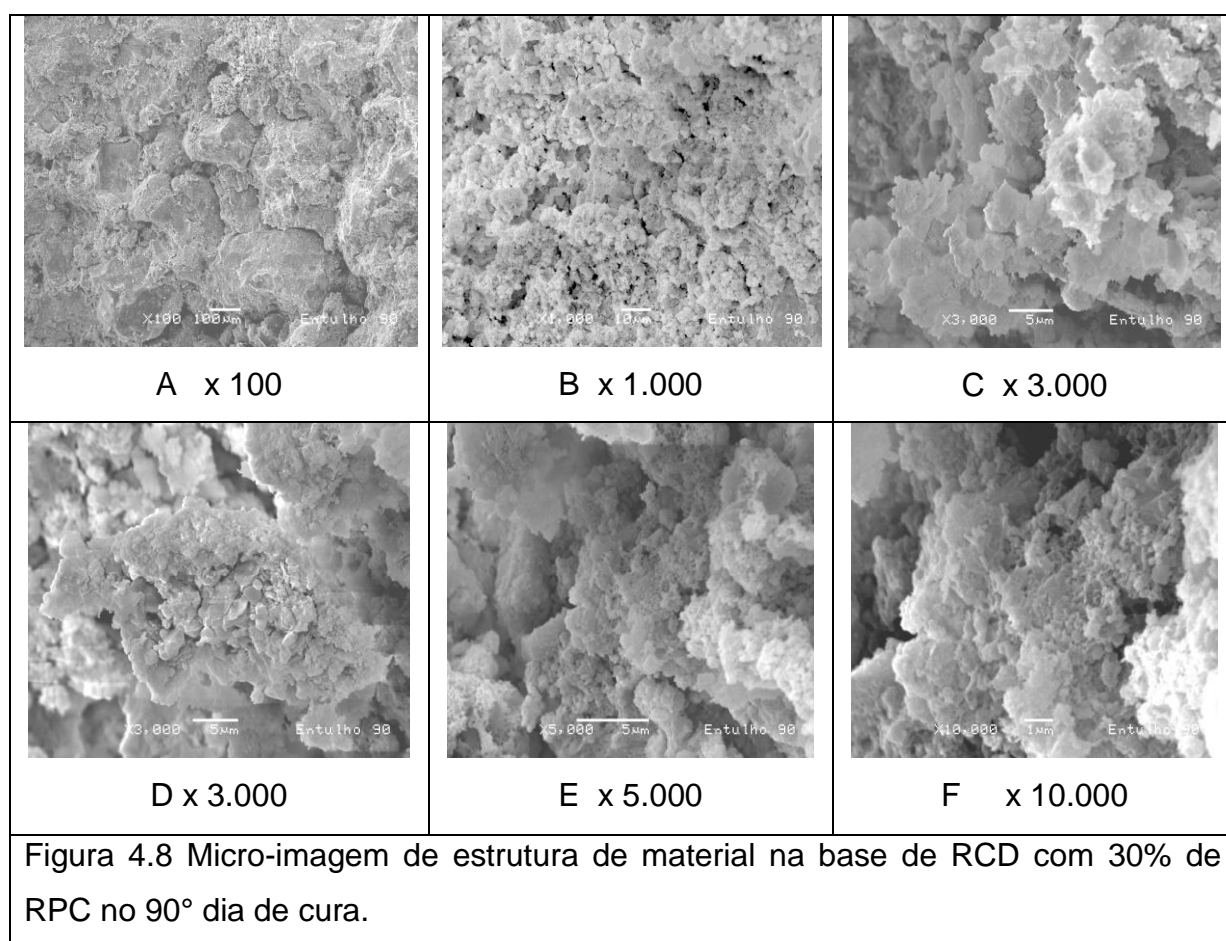
Contudo, na ampliação B (650x) pode-se ver que existem grandes diferenças entre os agregados. Na foto, nota-se um agregado de tamanho maior, rodeado por materiais aglomerantes, que durante os ensaios de resistência à compressão irão fraturar na zona matriz (fronteira entre agregado graúdo de RCD e pasta de RPC). Nas fotos existem poros de diferentes tamanhos e configurações, fraturas, porém, existem aglomerações ligando a pasta com o agregado maior.



Na ampliação C (1.000x), algumas regiões demonstram o contato das partículas de um grão maior com a pasta de ligante antiga, presente no RCD. Isto significa que, quanto maior o contato entre eles, maior a resistência do material.

Já nas ampliações D (8.000x), E (8.500) e F (10.000) pode-se ver a presença de poros, com diferentes tamanhos e pela primeira vez a presença de cristais com formas parecidas, em forma de drusas (aglomerações) de cristais separadas e as drusas de cristais, muito semelhantes aos carbonatos, confirmando os resultados de DRX; onde são fornecidos os teores de carbonatos presentes. Quase todo o restante são formas amorfas.

Informação semelhante quanto às formas amorfas, é possível verificar, estudando as estruturas de amostras RCD com 30% de RPC no 90º dia de cura (Figura 4.8). Nas ampliações A 100x toda a extensão da foto representa um monólito compacto, como concreto, sem grandes poros.





Nas ampliações de 1.000 vezes e acima, formam-se visíveis redes de poros entre diversas configurações. Com as ampliações de 3.000 vezes e maiores, é possível ver estruturas semelhantes a nuvens, típico de estruturas amorfas. Na superfície do material é praticamente impossível encontrar novas formações, como acontece com corpos semelhantes às formas cristalinas.

Este fato pode entrar em contradição com os resultados da DRX, onde o aumento das intensidades dos picos sugerem um crescimento da quantidade de cristais e o aperfeiçoamento das estruturas cristalinas durante o processo de cura das amostras.

## 5. CONCLUSÕES

1. Este trabalho confirma experimentalmente a possibilidade de obtenção de um novo material para construção civil à base de Resíduo de Construção e Demolição como matéria-prima principal para a confecção de tijolos maciços, tijolos com furos e blocos sem secagem preliminar, sem queima, sem cimento Portland.
2. Como materiais ligantes dos novos materiais acima citados, podem ser aproveitados o Resíduo de Produção de Cal (calcário mal queimado). Em caso de ausência local de RPC, pode ser usada Cal virgem de mercado. Além disso, pode ser usado também cimento Portland, porém, esta escolha aumentaria significativamente o custo do produto fabricado.
3. A percentagem de compósitos desenvolvidos neste projeto pode ser variada em amplos limites, dependendo de demandas do construtor e dos fatores econômicos. Nesta pesquisa, foram usados os compósitos com teor de ligante de 15 a 30%. As propriedades mecânicas de materiais desenvolvidos dependem de composições, tecnologias de fabricação e tempo da cura. Neste projeto os valores de resistência uniaxial de materiais com RPC oscilam no 3º dia, entre 2,2 e 4,0 MPa; no 7º dia, entre 5,7 e 7,9 MPa e no 180º dia entre 12,3 e 15,6 MPa. O mesmo compósito com uso de Cal virgem tem, no 3º dia de 4,5 a 5,3 MPa; no 7º dia, de 2,2 a 5,1 MPa e no 180º dia, de 12,3 a 15,6 MPa. Conforme a NBR 7170 (1983), as resistências uniaxiais dos tijolos maciços, devem ser as seguintes: Classe A < 2,5 MPa; Classe B entre 2,5 e 4,0 MPa; Classe C > 4,0 MPa. Outras propriedades mecânicas (resistência à água, absorção de água, dilatação) pesquisadas mantem-se dentro do prescrito na NBR ou prevalecem.
4. Por meio dos métodos de DRX e MEV, foi estabelecido que o endurecimento de materiais aconteceu através de processos físico-químicos de hidratação de resíduo de produção de cal ou de cal de mercado, a interação química e mecânica desses produtos de hidratação, com síntese de pequena quantidade de novas formações cristalinas e amorfas de Calcita. Porém, tão pequeno crescimento de cristais de carbonatos não pode explicar o aumento da resistência dos materiais durante 90

dias até 12 MPa e 16,9 MPa durante 180 dias. Com os mesmos métodos foi confirmada a síntese de significativa quantidade de materiais amorfos – produtos de interação química do ligante hidratado com os componentes de RCD e de carbonatos amorfos.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- 1) Realizar os ensaios de Resistência à Tração nos corpos-de-prova;
- 2) Trabalhar com um maior número de corpos-de-prova para conferir maior confiabilidade aos resultados;
- 3) Testar novas composições, com outros tipos de RCD (com maior teor de cerâmicas, gesso, etc.);
- 4) Realização de outros ensaios para caracterização da matéria-prima quando esta for de origem desconhecida como, por exemplo: massa específica real, área específica, determinação da atividade pozolânica, etc.
- 5) Fazer Análise Química Elementar com EDS na Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras ensaiadas;
- 6) Realizar a Análise Térmica Diferencial (ATD) da melhor composição;
- 7) Estudo da viabilidade econômica.

## GLOSSÁRIO

- 1) Agregados Reciclados – Material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construções que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura ou outras obras de engenharia (PIGRCC, 2004).
- 2) Área de Destinação de Resíduos – Áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos (PIGRCC, 2004).
- 3) Área de Transbordo – Áreas destinadas ao armazenamento temporário de resíduos da construção civil. (PIGRCC, 2004)
- 4) Aterro de resíduos da construção civil - Área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.
- 5) Beneficiamento - Ato de submeter um resíduo a operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.
- 6) Bota-fora – Áreas públicas ou privadas para disposição de resíduos predominantemente inertes que absorvem principalmente os resíduos da construção e demolição.
- 7) Entulho – Parcela mineral dos resíduos provenientes das atividades de construção e demolição. (LEVY, 1997). Esta definição não considera atividades envolvidas em construções de estradas. (HONG KONG POLYTECHNIC, 1993).

- 8) Geradores – Pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos da construção. (PIGRCC, 2004)
- 9) Gerenciamento de Resíduos – Sistema de gestão que visa reduzir ou reciclar resíduo, incluindo planejamento, responsabilidade, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos (PIGRCC, 2004).
- 10) Reciclagem – Processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação (PIGRCC, 2004).
- 11) Reutilização - Processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo (PIGRCC, 2004).
- 12) Resíduos da Construção e Demolição (RCD) – Provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros, comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (PIGRCC, 2004).

## REFERÊNCIAS

ALTHEMAN, D. **Avaliação da Durabilidade de Concretos Confeccionado com Entulho de Construção Civil**. Relatório Final das Atividades de Iniciação Científica, apresentado a FAPESP, agosto de 2002. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Faculdade de Engenharia Civil – FEC. Departamento da Construção Civil.

ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453**. Cal virgem para construção civil – Requisitos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7173**. Concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277**. Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação da retração de água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.

BERNARDES, Alexandre. **Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição no Município de Passo Fundo-RS**. Passo Fundo, 2006. Dissertação. Universidade de Passo Fundo – Faculdade de Engenharia e Arquitetura.

BORREGO, E.R. **Medio Ambiente**. Monografia. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2008

CALLISTER Jr, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**, 5ª. Ed. Editora LTC, 2002.

CUNHA, N.A. **Resíduos da Construção Civil Análise de Usinas de Reciclagem**. Universidade Estadual de Campinas –Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2007.

CASSA, J. C. S., CARNEIRO, A. P. e BRUM, I.A.S. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção**. Salvador, Editora da UFBA, Caixa Econômica, 2001.

CINCOTTO, A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. A Construção, São Paulo: PINI, n 1855, p. 27-30, ago, 1983.

DOMAKOSKI, J.F.S. **Arranjo Produtivo de Cal e Calcário do Paraná –APLCPr: Um Estudo sob o Enfoque da Teoria dos Custos de Transação**. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª. Ed. – São Paulo: Pini, 2002.

GRIGOLETTI, G. C. **Caracterização dos Impactos Ambientais de Indústrias de Cerâmica Vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2001. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia.

HANSEN, T. C.; BOEGH, E. **Elasticity and shrinkage of recycled-aggregate concrete**. ACI Journal, v.82, n.56p. 648-652, 1985.

HANSEN, T. C. **Recycled concrete aggregate and fly ash produce concrete without strength cement**. Cement and Concrete Research, v. 20, n.3, p. 355-356, 1990.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. Londres: Spon, 1992

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SENSO 2000**.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY . **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions. Vol 1**. 2007. OECD Publishing. Paris – França.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992

JADOWSKI, I. **Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição**. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Universidade de São Paulo, 2000, 102p.



JOHN, V. M; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos na construção**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da USP (PCC USP), 2001.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas**. 2000.

JUNIOR, N. B. C. **Cartilha de gerenciamento de resíduos sólitos para construção civil**. SINDUSCON-MG, 2005. 38p. CDU:628544:624 CONSTRUÇÃO CIVIL – RESÍDUOS SÓLIDOS

LAGUETTE, M. J. **Reciclaje: la clave para la conservación de recursos**. CONSTRUCTION PAN-AMERICANA, julho 1995.

LEVY, S. M.; HELENE, P.R.L. **Reciclagem de Entulhos na Construção Civil a Solução Política e Ecologicamente Correta**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1º Goiânia, Brasil. Agosto 1995 Anais. Goiânia, Pp 315-325.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Propriedades mecânicas de argamassas produzidas com entulho de construção civil**. In: Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: PCC – USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 1996. 161 p. p. 138-148.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado. 1997, 146 p.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretores e elaboração de textos básicos para normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**, 1999. 240p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMA, J.A.R. **Aggregate obtained from C&D waste recycling – Proposition of specification for use in concrete**. 2000. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice, São Paulo, 2000. Proceedings. São Paulo, EPUSP, 2000.

MARQUES NETO, José da Costa. **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na bacia hidrográfica do Turvo Grande (UGRHI-15)** [online]. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009. Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI. São Paulo, 1994.

MYMRIN, V.A., **Synthesis of five main mono-minerals of Portland Cement**. Report of the Research Department of Geology Faculty, Moscow State University of Lomonosow (MGU), 7.1967 - 12.1968.

MYMRIN, V.A., **Influencia do tratamento de água em campo magnético para hidratação de monos-minerais de cimento Portland**. Relatório do Projeto da Universidade Federal de Moscou (MGU), 7.1968 -12.1969.

MYMRIN, V.A., Correa S. M. 2007. **New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste. "Construction and Building Materials"**, 21 (2007), pp.578-582,

MYMRIN, V.A., SILVA, Margarete Bernal de Lima e., STELLA, Jacqueline Colucci, PAN, Roberto Chun Yan., SILVA, Waldyr de Lima e., **Reuse of construction and demolition wastes with lime production waste for new construction materials production**. International Conference on Innovation. Technology and Internationalization for Sustainability (ICITIS2012)Curitiba-Brazil, 15-17 Nov, 2012.

MYMRIN, V.A., WALTRICK, Carlos., CERRI, José A., COLUCCI, Jacqueline., PAN, Chun Yan., **The Effect of Plaster Waste and Debris Incorporation in Concrete-Like Materials**.International Conference on Innovation,Technology and Internationalization for Sustainability (ICITIS2012)Curitiba-Brazil, 15-17 Nov, 2012.

MYMRIN, V.A., CORRÊA, Sandra M., PONTE, Haroldo A., **New construction material from concrete production and demolition waste and lime production waste**. 5-th International Conference "Cooperation for Waste Issues",April 2 - 3, 2008, Kharkiv, Ukraine.

MYMRIN, V.A., **Entulho como matéria-prima principal para construção de materiais de construção civil**. PI 0901571-0 de 02/04/2009.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. 2ª. edição. São Paulo: PINI, 1997.

OFFERMANN, E.H. **O futuro da reciclagem de entulho de construção** (Tradução). Hochschuljournal Essen, n. 52, 1987.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. 1º Edição. Editora Hemus. 2007

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 12ª. edição. Editora Globo, 1993.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 2ª. edição. Editora Globo, 1976.

PENG, C; SCORPIO, D.E; KILBERT, C.J. **Strategies for succsesful construction and demolition waste recycling operations**. Construction, Management and Economics. London, v.15, n.1, p.49-58, 1997.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Universidade de São Paulo, 1999, 189p.

PINTO, T.P. **Reaproveitamento de resíduos de construção**. Revista Projeto, n.98, p. 137-138, 1987.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. **Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil do Município de Curitiba – Regulamento.** Secretaria Municipal do Meio Ambiente, Curitiba, novembro de 2004.

RAPAZOTE, J.G. **Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) - Resistance to Acid Attack.** Advances in science and Tecnology, 69 ,P. 156-163. 2011.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307, DE 05 DE JULHO DE 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Publicada no DOU de 17 de julho de 2002

ROTH, C.G. **Resíduos sólidos da Construção de Edificações: A Solução Pela Gestão Urbana.** Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 2008.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S.; SOUZA, F. R. **Estudo da resistência à compressão e da absorção de água em concretos produzidos com a adição conjunta de resíduos de construção e demolição e lodos de estações de tratamento de água.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.4, n.2, p. 31-40, abr./jun. 2004.

SABAI, M.M., COX, M.G.D.M., MATO, EGMOND, E.L.C., LICHTENBERG, J.J.N., **Concrete block production from construction and demolition waste in Tanzania.** Resources, Conservation and Recycling, 72.P.9-19. 2013.

SANTOS, D.R. **Propriedades do Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Resíduos da Etapa de Produção das Alvenarias.** Dissertação. Universidade Federal de Goiás. 2006.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados em Estruturas de Solo Cimento.** Dissertação. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

SECRETARIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2007.** – Brasília: MCIDADES.SNSA, 2009.

SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo. **Gestão Ambiental de Resíduos da construção Civil: a experiência do SINDUSCON-SP.** Coordenador: Tarciso de Paula Pinto. Obra Limpa: I&T: 2005.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, F. **Recycling of masonry rubble: recycling of demolished concrete and masonry.** Editado por T. C. Hansen. Londres: Spon, 1992. Part 2.

SCHNEIDER, D.M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo.** Dissertação. Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública. São Paulo, 2003.

SENGEL, S., TOPÇU, I.B. **Properties of concrete produced with waste concrete aggregate**. Civil Engineering Departament, Osmangazi University, Turkey, 2003.

SILVA, A.F.F. **Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil de Acordo com a Resolução CONAMA Nº 307/02-Estudo de Caso Para um Conjunto de Obras de Pequeno Porte**. Dissertação, UFMG, Belo Horizonte-MG, 2007.

SOARES, B. D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, composição térmica e otimização paramétrica**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2007.

SOUSA, J.G. G. de. **Contribuição ao Estudo da Relação entre Propriedades e Proporcionamento de Blocos de Concreto – Aplicação ao Uso de Entulho como Agregado Reciclado**. Brasília: Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. 2001. 142p.

SULEIMAN, M.K., BHAT, N.R., JACOB, S.. **Utilization of By-Product Materials of Building Construction and Demolition to Conserve Water and Soil in Kuwait**. World Applied Sciences Journal 22 (11): 1619-1629. 2013

ZORDAN, S. E. **Reciclagem de Entulho da Indústria da Construção Civil**. Revisão do trabalho: A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto, 1997.

ZORDAN, S. E. **Entulho da Indústria da Construção Civil**. Ficha Técnica. PCC/USP, 1998.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado na Confecção do Concreto**. Campinas: Departamento de Saneamento e Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Dissertação (Mestrado), 1997.

V SBTA – **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, São Paulo, 2003. Anais. Coordenação. M.A. Cincotto, V.M.John.

VALVERDE, F.M. **Agregados para Construção Civil**. Balanço Mineral Brasileiro DNPM/MME. Brasília, DF, 2001.

UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Curso de Engenharia Civil **Gerenciamento de Resíduos Sólidos - MERCADO DA RECICLAGEM (Trabalho 2)**. 2001.